A. de Lapparent

Abrégé

de

Géologie

Paris

Masson & C[ie] Éditeurs


HARVARDIANA
ACADEMIA · IN · NOV · ANG
VE
RI
TAS
CHRISTO ET ECCLESIAE

ABRÉGÉ

DE

GÉOLOGIE

DU MÊME AUTEUR

Traité de géologie, cinquième édition, entièrement refondue et considérablement augmentée. 3 vol. gr. in-8 comprenant ensemble XVI-2016 pages avec 883 fig., cartes et croquis. 38 fr.

Cours de minéralogie, troisième édition, revue et augmentée. 1 vol. gr. in-8 de XX-703 pages avec 619 gravures dans le texte et une planche chromolithographiée. . . . . 15 fr.

Précis de minéralogie, quatrième édition, revue et corrigée. 1 vol. in-18 de XII-412 pages avec 335 gravures dans le texte et une planche chromolithographiée . . . . 5 fr.

Leçons de géographie physique, deuxième édition, revue et augmentée. 1 vol. grand in-8 de XVI-718 pages avec 162 fig. dans le texte et une planche en couleurs. . . . . . . 12 fr.

La géologie en chemin de fer. Description géologique du Bassin parisien et des régions adjacentes (Bretagne aux Vosges. — Belgique à Auvergne). 1 vol. in-18, cartonné en toile anglaise, non rogné, de 608 pages avec 2 cartes chromolithographiées et 1 carte de coupes. . . . . 7 fr. 50

Le siècle du fer. 1 vol. in-18 de 360 pages. . . . . . 3 fr. 50

938-06. — Coulommiers. Imp. PAUL BRODARD. — 7-06.

ABRÉGÉ
DE
GÉOLOGIE

PAR

A. DE LAPPARENT
MEMBRE DE L'INSTITUT

SIXIÈME ÉDITION

REVUE, CORRIGÉE ET AUGMENTÉE

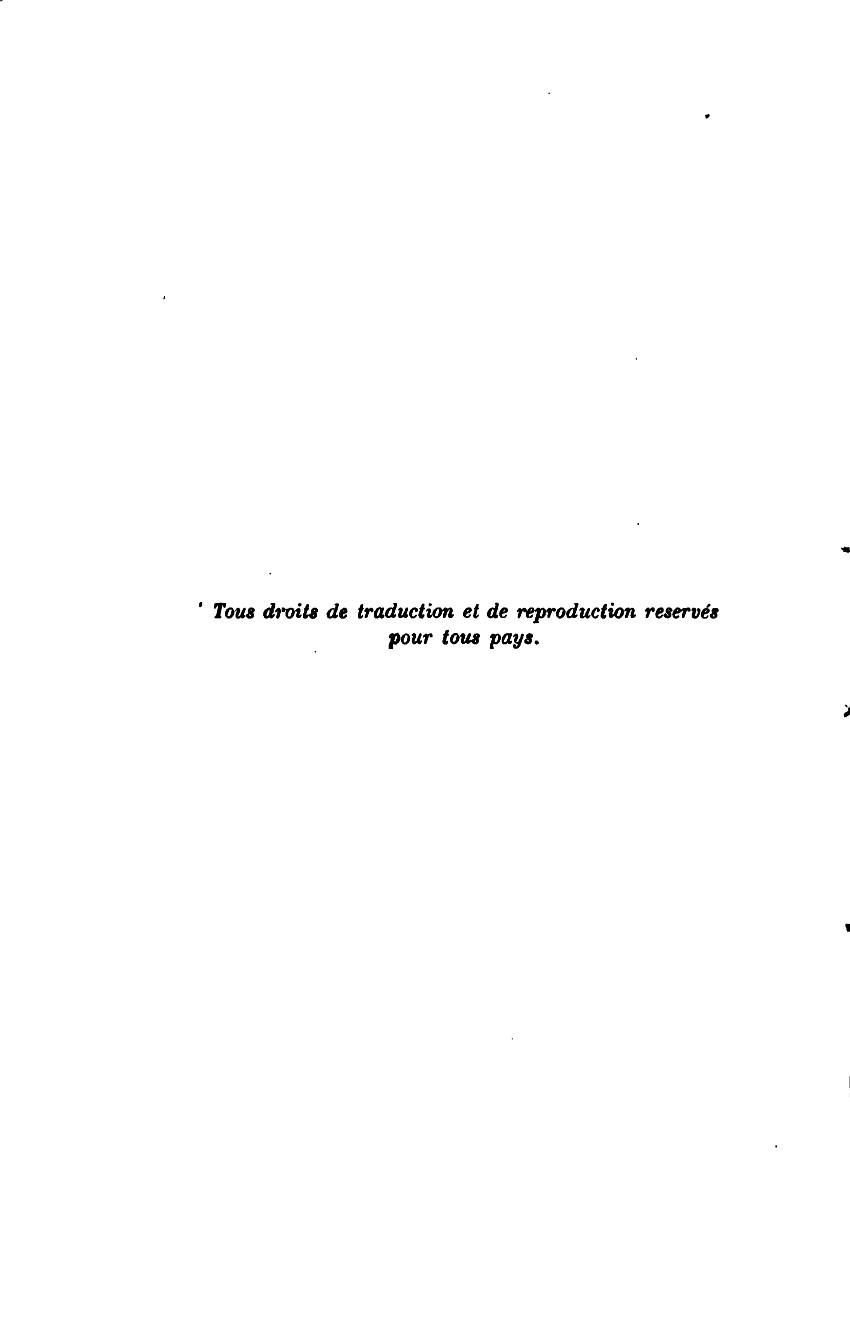
---

163 figures dans le texte

ET UNE CARTE GÉOLOGIQUE DE LA FRANCE EN CHROMOLITHOGRAPHIE

PARIS
MASSON ET C[ie], ÉDITEURS
LIBRAIRES DE L'ACADÉMIE DE MÉDECINE
120, BOULEVARD SAINT-GERMAIN

1907



PRÉFACE

DE LA PREMIÈRE ÉDITION

Ce livre est destiné à la fois aux personnes désireuses d'acquérir une connaissance générale des données de la Géologie et aux élèves des établissements d'instruction secondaire, où l'enseignement de cette science intervient à deux reprises durant le cours des études classiques. Laissant de côté les détails, traités dans un autre ouvrage[1] avec tous les développements voulus, on s'est proposé surtout de faire ressortir la magnifique harmonie des phénomènes géologiques et de mettre en pleine lumière les grandes idées d'*ordre* et de *finalité*, dont l'histoire du globe est comme imprégnée.

L'*Abrégé de Géologie* est un exposé très succinct, qu'on a cherché à rendre aussi substantiel que pos-

1. Voir notre *Traité de Géologie*, 5e édition. Paris, 1906.

sible, et dont chaque alinéa résume un chapitre de la science. Mais en même temps l'auteur a mis tous ses soins à éviter, dans la forme, l'aridité qui pouvait résulter d'une telle condensation. Il espère que cet effort sera apprécié, non seulement par la jeunesse studieuse, mais par les géologues de profession, à qui l'enchaînement des faits et des doctrines pourra sembler d'autant plus frappant que l'impression générale sera moins affaiblie par le luxe des détails.

Ce livre aurait atteint son but si, tout en satisfaisant la légitime curiosité de ceux qui bornent leur ambition à la connaissance des grandes lignes de l'histoire terrestre, il parvenait à éveiller, chez beaucoup de jeunes gens, le goût de la culture de la Géologie. On peut dire de cette science que l'objet en est aussi attachant que la pratique en est saine. Comprendre la structure du sol qu'on foule aux pieds; démêler la raison de ses formes si diverses, de ses productions si variées; faire revivre les époques disparues, non par les rêves de l'imagination, mais par une série d'inductions appuyées sur l'expérience; quelle perspective séduisante pour un esprit cultivé! Quel surcroît d'intérêt dans les voyages, surtout quand vient s'y joindre l'attrait de la recherche des minéraux ou de la récolte des fossiles! En même temps, pourrait-on désirer un meilleur emploi de ses loisirs que ces courses au grand air, qui entretien-

nent l'activité du corps, tout en obligeant l'esprit à une constante et intelligente contemplation des beautés de la Création?

Si, pendant longtemps, ces satisfactions ont dû rester le privilège de quelques initiés, il est temps qu'elles se répandent et que le grand nombre soit appelé à en jouir. La Géologie est assez avancée aujourd'hui, elle est en possession de résultats suffisamment précis, pour que la réalisation d'un tel vœu ne soit pas une espérance chimérique. Il est du moins permis d'y travailler, et c'est à quoi prétend ce petit livre, dont l'auteur n'ambitionne pas de meilleure récompense que le succès de ses efforts en faveur de la diffusion d'études dont il lui a été donné d'apprécier le mérite.

A. de Lapparent.

PRÉFACE

DE LA CINQUIÈME ÉDITION

La cinquième édition de l'*Abrégé de Géologie* pourrait être à bon droit présentée comme un ouvrage nouveau. Ce n'est pas seulement à cause de l'augmentation considérable, qui a porté le nombre des pages de 296 à 424. Mais la refonte dont la description des époques géologiques a été l'objet a totalement modifié le caractère de l'œuvre.

Pendant longtemps, la connaissance tant soit peu précise de la constitution de l'écorce terrestre n'a embrassé qu'une très minime portion de la surface du globe. En dehors de l'Europe occidentale, elle-même insuffisamment étudiée, on ne possédait, sur le reste de la terre, que quelques données éparses. Aussi l'enseignement de la géologie était-il forcément *descriptif* et *analytique*. Faire connaître, pour chaque terrain, des coupes classiques, et indiquer, à l'aide des fossiles, la concordance probable des séries observées en des points éloignés, à cela devait se

borner, avec quelques considérations générales sur la succession des êtres organisés et sur les manifestations de l'énergie interne, l'ambition des auteurs de manuels.

Il n'en est plus ainsi aujourd'hui. Depuis vingt ans surtout, l'écorce terrestre a été fouillée sous presque toutes les latitudes et tous les méridiens. S'il reste encore bien des lacunes et des incertitudes de détail, du moins il est devenu possible d'essayer de donner, à la description des époques géologiques, une continuité et une tournure synthétique qui avaient fait défaut jusqu'ici.

La géologie est une histoire, celle de la formation de l'écorce terrestre. Cette histoire demande à être racontée comme celle de l'humanité; c'est-à-dire en ordonnant le récit des épisodes, de manière à faire ressortir la liaison qui les unit dans l'espace et dans le temps. Reconstituer les *états géographiques successifs* de notre planète, en mettant en lumière l'ordre remarquable qui a présidé à cette évolution, tel est l'idéal qui doit s'imposer aujourd'hui à un auteur didactique.

C'est dans cet esprit qu'avait été conçue, il y a trois ans, la quatrième édition de notre *Traité de Géologie*. Prenant pour base de la description des terrains, non plus les grands *systèmes*, mais chacun des nombreux *étages* entre lesquels ces systèmes se

divisent, on s'était efforcé de suivre pas à pas, d'un bassin à l'autre, pour chaque époque, les transformations du régime des mers et des terres, en facilitant cette recherche à l'aide d'un grand nombre d'esquisses *paléogéographiques*. De cette façon, la méthode *narrative*, à la fois historique et géographique, prenait la place de l'ancienne méthode descriptive, prêtant plus d'intérêt et de vie à l'exposé des faits dont l'ensemble constitue l'histoire ancienne de la terre.

C'est le résumé de cette histoire, clarifié autant que possible et réduit aux traits essentiels, que prétend offrir aujourd'hui la cinquième édition de l'*Abrégé*. On y trouvera, pour la première fois, un essai de narration continue, propre à offrir, pour ceux qui pousseront plus loin l'étude de la science, un cadre méthodique, succinct mais suffisamment complet, dans les compartiments duquel il leur soit facile de ranger toutes les notions de détail qu'ils pourront être amenés à acquérir par la suite.

Pour la première fois aussi, dans un abrégé de géologie, on a cherché à donner des indications suffisantes sur les diverses parties de la surface terrestre, au lieu de se borner presque exclusivement, comme on le faisait jusqu'ici, à ce qui intéresse la région française et son voisinage immédiat.

Il est vrai que le livre, ainsi modifié, dépasse en beaucoup de points ce qui conviendrait à des com-

mençants. Mais ces additions peuvent être négligées par ceux qui ne tiennent à connaître que les traits fondamentaux de l'histoire du globe. A ceux-là, en effet, il suffira de se borner aux généralités dont l'exposé précède la description de chaque époque, laissant de côté les paragraphes consacrés aux divers étages, et qui répondent à un autre ordre de besoins. Ainsi l'ouvrage pourra être utilisé, à la fois par les élèves de l'enseignement secondaire, en vue d'une initiation générale, et par les étudiants spécialisés, auxquels il permettra de conserver une vue précise des grandes lignes, à travers la multiplicité des détails où la pratique de la géologie les force à pénétrer.

Puisse le livre, sous sa forme nouvelle, contribuer à accroître la clientèle d'une science qui, pendant longtemps, a paru réservée à un petit cercle d'adeptes, mais que son intérêt propre, joint au nombre toujours croissant de ses applications pratiques, rend digne aujourd'hui de s'imposer à l'attention de tous les esprits cultivés!

A. DE LAPPARENT.

AVERTISSEMENT

CONCERNANT LA SIXIÈME ÉDITION

Des changements importants ont été introduits dans cette nouvelle édition. En outre de quelques additions faites aux chapitres des volcans et des tremblements de terre, on a remanié et sensiblement augmenté ce qui concerne les roches d'origine éruptive. Plusieurs des esquisses paléogéographiques ont été changées. La description des terrains tertiaires a été refaite en conformité des divisions adoptées dans la cinquième édition de notre *Traité*. L'exposé des phases de l'époque quaternaire, notamment des vicissitudes des anciens glaciers, a été précisé et élargi. Enfin la partie relative aux phénomènes orogéniques a été l'objet d'une refonte complète, nécessitée par les nouvelles conceptions qu'ont fait prévaloir récemment les géologues alpins.

A. L.

TABLE DES MATIÈRES

Introduction, p. 1.

LIVRE PREMIER

PHÉNOMÈNES ACTUELS

CHAPITRE PREMIER. — FORMES ACTUELLES DU GLOBE TERRESTRE.

§ 1. Données générales sur le globe terrestre, p. 5. — § 2. Les conditions physiques à la surface du globe, p. 11.

CHAPITRE II. — DYNAMIQUE TERRESTRE EXTERNE.

§ 1. Définition de la dynamique terrestre, p. 17. — § 2. Action de l'atmosphère, p. 19. — § 3. Action des eaux courantes, p. 20. — § 4. Action de la mer, p. 39. — § 5. Action de la glace, p. 44. — § 6. Actions chimiques, p. 54. — § 7. Action des êtres vivants, p. 58.

CHAPITRE III. — DYNAMIQUE TERRESTRE INTERNE.

§ 1. Phénomènes volcaniques, p. 66. — § 2. Phénomènes thermaux, p. 81. — § 3. Géothermique. Théorie des phénomènes éruptifs, p. 88. — § 4. Mouvements de l'écorce terrestre, p. 95.

LIVRE DEUXIÈME

GÉOLOGIE PROPREMENT DITE
OU
HISTOIRE ANCIENNE DU GLOBE

CHAPITRE PREMIER. — NOTIONS GÉNÉRALES SUR L'ÉCORCE TERRESTRE.

§ 1. Composition générale de l'écorce, p. 103. — § 2. Roches massives ou éruptives, p. 106. — § 3. Principales variétés de roches éruptives, p. 115. — § 4. Roches sédimentaires, p. 124. — § 5. Principes de la stratigraphie, p. 132.

CHAPITRE II. — TERRAIN ARCHÉEN.

§ 1. Généralités sur le terrain archéen, p. 140. — § 2. Description du terrain archéen, p. 143.

CHAPITRE III. — ÈRE PRIMAIRE.

§ 1. Généralités sur l'ère primaire, p. 148. — § 2. Système précambrien, p. 150. — § 3. Système silurien : 1° Étage cambrien, p. 153. — § 4. Système silurien : 2° Étage ordovicien, p. 159. — § 5. Système silurien : 3° Étage gothlandien, p. 162. — § 6. Système dévonien : 1° Dévonien inférieur ou série éodévonienne, p. 165. — § 7. Système dévonien : 2° Dévonien moyen ou série mésodévonienne, p. 171. — § 8. Système dévonien : 3° Dévonien supérieur ou série néodévonienne, p. 174. — § 9. Système carboniférien : 1° Étage dinantien, p. 178. — § 10. Système carboniférien : 2° Étage westphalien-moscovien, p. 188. — § 11. Système carboniférien : 3° Étage stéphanien-ouralien, p. 196. — § 12. Mode de formation de la houille, p. 200. — § 13. Système permien : 1° Étage artinskien-autunien, p. 207. — § 14. Système permien : 2° Étage penjabien-saxonien, p. 213. — § 15. Système permien : 3° Étage thuringien, p. 215. — § 16. Éruptions de l'ère primaire, p. 219.

CHAPITRE IV. — ÈRE SECONDAIRE. — SYSTÈME TRIASIQUE.

§ 1. Généralités sur l'ère secondaire, p. 224. — § 2. Système triasique : 1° Série éotriasique ou étage werfénien, p. 226. — § 3. Système triasique : 2° Série mésotriasique, p. 233. — § 4. Système triasique : 3° Série néotriasique, p. 237.

CHAPITRE V. — SYSTÈME JURASSIQUE.

§ 1. Généralités sur le système jurassique, p. 243. — § 2. Série liasique. Données générales, p. 245. — § 3. Série liasique : 1° Étage rhétien, p. 248. — § 4. Série liasiqne : 2° Étage hettangien, p. 251. — § 5. Série liasique : 3° Étage sinémurien, p. 254. — § 6. Série liasique : 4° Étage charmouthien, p. 256. — § 7. Série liasique : 5° Étage toarcien, p. 259. — § 8. Série mésojurassique. Données générales, p. 262. — § 9. Série mésojurassique : 1° Étage bajocien, p. 263. — § 10. Série mésojurassique : 2° Étage bathonien, p. 265. — § 11. Série néojurassique. Données générales, p. 269. — § 12. Série néojurassique : 1° Étage callovien, p. 274. — § 13. Série néojurassique : 2° Étage oxfordien, p. 278. — § 14. Série néojurassique : 3° Étage séquanien, p. 281. — § 15. Série néojurassique : 4° Étage kimeridgien, p. 284. — § 16. Série néojurassique : 5° Étage portlandien, p. 287.

CHAPITRE VI. — SYSTÈME CRÉTACIQUE.

§ 1. Généralités sur la période crétacique. Série éocrétacique. p. 292. — § 2. Série éocrétacique : 1° Étage néocomien, p. 296. — § 3. Série éocrétacique : 2° Étage barrémien, p. 299. — § 4. Série éocrétacique : 3° Étage aptien, p. 303. — § 5. Série éocrétacique : 4° Étage albien, p. 305. — § 6. Série néocrétacique. Généralités p. 309. — § 7. Série néocrétacique : 1° Étage cénomanien, p. 313. — § 8. Série néocrétacique : 2° Étage turonien, p. 317. — § 9. Série néocrétacique : 3° Étage emschérien, p. 319. — § 10. Série néocrétacique : 4° Étage aturien, p. 323. — § 11. Série néocrétacique : 5° Étage danien, p. 327. — § 12. Éruptions de l'ère secondaire, p. 329.

CHAPITRE VII. — ÈRE TERTIAIRE. SYSTÈME ÉOGÈNE.

§ 1. Généralités sur l'ère tertiaire, p. 332. — § 2. Généralités sur la série éocène, p. 334. — § 3. Série éocène : 1° Étage landénien, p. 338. — § 4. Série éocène : 2° Étage yprésien, p. 341. — § 5. Série éocène : 3° Étage lutétien, p. 343. — § 6. Série éocène : 4° Étage bartonien, p. 346. — § 7. Généralités sur la série oligocène, p. 348. — § 8. Oligocène inférieur, p. 350. — § 9. Oligocène supérieur, p. 353.

CHAPITRE VIII. — SYSTÈME NÉOGÈNE.

§ 1. Série miocène. Généralités, p. 356. — § 2. Série miocène : 1° Étage aquitanien, p. 360. — § 3. Série miocène : 2° Étage bur-

digalien, p. 362. — § 4. Série miocène : 3° Étage vindobonien, p. 363. — § 5. Série miocène : 4° Étages sarmatien et pontien, p. 366. — § 6. Série pliocène, p. 368. — § 7. Éruptions de l'ère tertiaire, p. 372.

CHAPITRE IX. — ÈRE MODERNE OU QUATERNAIRE.

§ 1. Généralités sur l'époque pleistocène, p. 375. — § 2. Détails sur les dépôts pleistocènes, p. 383. — § 3. Causes des phénomènes glaciaires, p. 388. — § 4. Éruptions pleistocènes, p. 391.

CHAPITRE X. — FILONS MÉTALLIFÈRES, PHÉNOMÈNES OROGÉNIQUES.

§ 1. Filons métallifères, p. 392. — § 2. Phénomènes orogéniques, p. 396.

CHAPITRE XI. — CONSIDÉRATIONS GÉOGÉNIQUES.

§ 1. Causes des variations de la chaleur externe, p. 414. — § 2. Résumé cosmogonique, p. 419.
Tableau résumé des périodes géologiques, pp. 424-425.

APPENDICE

APERÇU GÉOLOGIQUE SUR LA RÉGION FRANÇAISE

§ 1. Développement progressif du sol français, p. 426. — § 2. Régions naturelles de la France, p. 431.

ABRÉGÉ

DE GÉOLOGIE

INTRODUCTION

La Géologie est la science qui a pour objet la structure de l'écorce terrestre. Par ce mot d'*écorce* nous entendons, sans rien préjuger relativement à la constitution intérieure de notre planète, la partie du globe accessible à nos investigations. En effet, la plus grande profondeur qu'un outil de sondage ait encore atteinte n'est guère que de 2 000 mètres, quantité tout à fait insignifiante à côté des 6 000 et quelques kilomètres que compte le rayon du globe. Aussi la portion de la terre que nous pouvons directement observer ne forme-t-elle qu'une mince pellicule relativement à l'ensemble.

L'étude de cette écorce n'est pas, pour l'homme, un simple objet de curiosité. Elle lui est imposée par la nécessité où il est d'aller chercher, dans le sein de la terre, les substances nécessaires au développement de la civilisation matérielle. En effet, c'est là que sont renfermés, avec les matériaux de construction, les minerais d'où l'on extrait les métaux, les matières premières des produits chimiques, les amendements indispensables à l'agriculture, enfin et surtout les combustibles minéraux, ce pain quotidien de l'industrie moderne.

Or la recherche de ces substances utiles demande à être guidée par des règles précises, qui dispensent le mineur des longs et coûteux tâtonnements où l'entraîneraient des travaux poussés à l'aventure. Ignorées au début, ces règles sont nées, les unes après les autres, de l'expérience des générations successives, s'appliquant à définir les conditions de gisement des minéraux. Longtemps cette définition ne s'est traduite que par des formules empiriques, suffisantes pour servir de base à l'*art des mines*. Mais à mesure que ces formules devenaient plus précises, elles prenaient aux yeux des esprits généralisateurs une signification telle, qu'il suffisait de les rapprocher intelligemment les unes des autres pour en tirer la connaissance des grandes lignes architecturales de l'édifice terrestre. Ainsi s'est constituée, sinon la géologie proprement dite, du moins la partie descriptive de cette science ou la *géognosie*.

D'autre part, l'état actuel de notre planète n'est pas le produit d'un acte créateur instantané. De même qu'un édifice se compose d'assises superposées, dont les plus anciennes occupent la base et que souvent, si la construction a embrassé une longue durée, on en peut démêler les diverses phases d'après le style des parties successives; de même l'écorce du globe est constituée par des matériaux d'origines et de dates diverses. De cette façon, il est impossible d'étudier l'architecture de la terre sans toucher du même coup à son histoire. Ainsi, après s'être d'abord simplement proposé la découverte de règles pratiques pour guider les mineurs, on arrive, par la force des choses, en face du plus intéressant des problèmes, celui qui consiste à déchiffrer l'*histoire de la planète terrestre*. Et comme, lorsqu'il s'agit de la nature, toute l'histoire se résume dans la grande idée d'*ordre*, les efforts du géologue doivent tendre à mettre en évidence cette notion fondamentale, en nous apprenant à reconnaître l'*ordre suivant lequel les matériaux du globe ont été disposés dans le temps et dans l'espace.*

C'est cette mission historique qui fait, à vrai dire, le principal intérêt de la Géologie; intérêt d'autant plus grand qu'au lieu d'une succession monotone de phénomènes identiques, l'histoire de la terre nous fait assister à une suite merveilleusement ordonnée de transformations, et met sous nos yeux, à

mesure que nous remontons le cours des âges, des tableaux de plus en plus différents de ceux qu'il nous est donné de contempler aujourd'hui.

Mais de là résultent aussi des difficultés d'un ordre tout particulier. Quand l'historien cherche à faire revivre, à l'aide des monuments, des inscriptions ou des sépultures, ces peuples primitifs à l'égard desquels la tradition est restée muette, il est puissamment aidé dans sa tâche par la connaissance des nécessités de la nature humaine. Un secours analogue fait souvent défaut au géologue, et parmi les matériaux dont le globe se compose, matériaux qui tous sont des monuments du passé, beaucoup s'écartent à un tel degré des objets habituels de nos expériences, qu'on peut à peine soupçonner les conditions sous l'empire desquelles ils ont dû se constituer.

Heureusement cette variété ne porte que sur les associations et les combinaisons des substances. Ces dernières n'ont jamais changé, non plus que la nature des forces auxquelles elles ont toujours été soumises. L'observation directe, et, à son défaut, l'expérimentation, doivent pouvoir rendre compte des combinaisons constatées, et ainsi l'étude du présent s'impose comme seule apte à nous fournir la clef du passé.

Cette nécessité éclate dès le premier coup d'œil qu'on jette sur l'écorce solide. En effet, partout où des travaux de carrières, de mines ou de chemins de fer ont entamé cette écorce sur une certaine étendue, on constate que les matériaux ou *roches* dont elle est formée se groupent autour de deux types principaux.

Le premier comprend des roches disposées en assises, couches, ou feuillets parallèles d'une grande régularité, et que, pour ce motif, on appelle roches *stratifiées*. Chacune peut être aujourd'hui plus ou moins solide, à la faveur d'un ciment naturel qui en a aggloméré les éléments. Mais il est visible que ceux-ci sont des débris, empruntés à des roches préexistantes (d'où le nom de roches *détritiques*), et généralement à angles arrondis, comme tout ce qui a subi un transport. De plus, ils sont disposés de telle sorte, que leur plus grande dimension soit couchée dans le plan même des feuillets, comme si, ayant été en suspension dans un liquide, ils

étaient tombés sur le fond en vertu de la pesanteur, ce qui leur vaut la qualification de *dépôts sédimentaires*. Leur analogie est parfaite avec les sédiments qu'on voit aujourd'hui se former à l'embouchure des fleuves ou le long des rivages maritimes; et cette analogie se complète lorsque, au sein de ces roches stratifiées, on trouve, à l'état de *pétrifications* ou *fossiles*, les restes des animaux qui vivaient dans les eaux où s'est opéré le dépôt.

L'autre catégorie de matériaux de l'écorce consiste en roches *massives*, dépourvues de toute stratification. Elles sont formées d'éléments parfois vitreux, beaucoup plus souvent cristallisés, qui ne sont pas des débris charriés, et dont l'arrangement accuse la prise en masse d'une matière primitivement fluide ou visqueuse. Leur analogie avec les laves volcaniques est évidente, d'autant mieux que, quand le contact des deux catégories de roches peut être observé, on voit souvent celles de la seconde pénétrer à travers les dépôts stratifiés en veines ou en filons, absolument comme les laves modernes sont parfois injectées au milieu des terrains avoisinants. Il est donc légitime d'attribuer à ces roches massives une origine interne ou *éruptive*.

Puisque l'écorce terrestre se montre ainsi constituée, cela veut dire que sa formation résulte vraisemblablement du jeu simultané d'agents semblables à ceux qui, de nos jours encore, engendrent, d'un côté les sédiments, de l'autre les roches éruptives; les premiers, nés de la constante dégradation de la terre ferme par les eaux; les secondes, dues à l'activité volcanique, c'est-à-dire à l'énergie interne de notre globe.

Or, si l'intensité et le mode de groupement des forces ont pu varier dans le cours des siècles, du moins leur essence a toujours été la même. Voilà pourquoi, afin de bien comprendre l'histoire ancienne de notre planète, il est utile et même indispensable de lui donner pour préface l'étude des phénomènes dont nous sommes aujourd'hui les témoins; étude qui réclame à la fois la connaissance de l'état présent du globe et celle des diverses actions par lesquelles sa surface est constamment remaniée.

LIVRE PREMIER

PHÉNOMÈNES ACTUELS

CHAPITRE PREMIER

FORMES ACTUELLES DU GLOBE TERRESTRE

§ 1

DONNÉES GÉNÉRALES SUR LE GLOBE TERRESTRE

Dimensions, révolution et rotation de la terre. — La terre est un globe presque exactement sphérique, de 40 000 kilomètres environ de circonférence et d'un rayon moyen égal à 6 371 kilomètres, décrivant en une année une courbe plane elliptique autour du soleil, dont son centre est éloigné d'à peu près 150 millions de kilomètres. A cette distance, malgré les grandes dimensions de l'astre central comparées à celles de la terre, les rayons lumineux envoyés à notre planète sont parallèles entre eux, comme s'ils venaient de l'infini. Leur faisceau cylindrique touche donc la terre suivant un *grand cercle d'illumination*, qui la partage à tout instant en deux moitiés, l'hémisphère éclairé et l'hémisphère obscur.

D'ailleurs, en même temps qu'elle accomplit sa révolution annuelle, la terre tourne sur elle-même en vingt-quatre heures, autour d'une ligne de direction fixe, qu'on appelle l'*axe des pôles*.

Traits fondamentaux du dessin géographique. — La surface du globe se partage entre trois sortes d'éléments : l'élément solide ou *terre ferme*, l'élément *liquide* ou *océan*, l'élément *gazeux* ou *atmosphère*. L'atmosphère constitue, autour des deux autres éléments, une couche régulière d'épaisseur inconnue, mais dont la partie inférieure a seule de l'intérêt pour le géologue, vu la rapidité avec laquelle l'air, au voisinage des hauts sommets, se raréfie et devient incapable d'effets mécaniques ou physiques.

Lorsqu'on jette les yeux sur une mappemonde, on ne peut manquer d'être frappé de l'inégale répartition de la terre et des mers. D'abord celles-ci l'emportent de beaucoup en étendue, car elles couvrent près des trois quarts de la superficie du globe. En outre, la majeure partie de la terre ferme est concentrée dans l'hémisphère boréal, où les masses continentales s'épanouissent, en quelque sorte, dans les latitudes moyennement élevées, tandis qu'elles n'envoient dans l'hémisphère austral que des prolongements de forme pointue. Inversement les océans, largement soudés au sud, se terminent en pointe dans le nord. Alors que le pôle boréal est occupé par une mer, à la vérité envahie par les glaces, c'est un continent qui, selon toute probabilité, surgit au pôle antarctique, où il sert d'appui à d'énormes banquises.

Cette opposition des terres et des mers est si marquée, qu'en prenant pour pôle un point situé à peu de distance du Pas-de-Calais, on peut former un hémisphère où la superficie continentale serait presque égale à la superficie océanique, tandis que, dans l'autre, il y aurait environ neuf parties de mer pour une seule partie de terre. De plus, un *vingtième* seulement de la superficie continentale du premier hémisphère aurait, dans le second, ses antipodes représentés par de la terre ferme.

De cette façon, il est permis de dire que le trait fondamental de la surface terrestre est l'*opposition diamétrale* qui fait que, presque partout, à une saillie continentale correspond, de l'autre côté du même diamètre, une dépression maritime. La forme de la terre est donc tout l'opposé de ce que les géomètres appellent une *figure centrée*.

Un autre trait caractéristique du globe est l'existence d'une série de golfes ou de mers intérieures qui, dans l'hémisphère boréal, partagent en deux les masses continentales : ainsi le golfe du Mexique, qui sépare les deux Amériques; la Méditerranée, entre l'Europe et l'Afrique; le golfe Persique, les mers indiennes et polynésiennes, entre l'Asie et ses dépendances méridionales; comme s'il y avait eu dans l'écorce terrestre, à peu de distance de l'équateur, quelque cause de faiblesse, capable de déterminer par affaissement la formation d'un sillon presque continu.

Enfin, tandis que l'océan Pacifique, sur tout son pourtour, est bordé par des chaînes de montagnes, comme la Cordillère des Andes, ou par des chaînes d'îles, telles que celles de l'Asie orientale, qui représentent les sommets de Cordillères en grande partie submergées, rien de pareil ne se montre sur les côtes de l'Atlantique, dont le tracé paraît indépendant de toute ligne directrice. Pour compléter cette différence, une ligne continue de volcans entoure le Pacifique, tandis que l'Atlantique n'en présente que dans son axe. Et en dehors de ces régions, c'est aussi dans la dépression méditerranéenne, elle-même intimement liée au parcours des chaînes des Alpes, de l'Himalaya et des Antilles, que les autres volcans paraissent concentrés.

Valeur du relief. Signification de l'aplatissement du globe. — Nulle part la surface de la terre ferme ne dépasse d'une grande quantité le niveau de l'océan; car même les plus hautes montagnes (8 800 mètres dans l'Himalaya) ne représentent pas la *sept-centième* partie du rayon terrestre. Aussi est-il impossible de les rendre sensibles aux yeux sur un dessin à petite échelle de notre globe. Il y a d'ailleurs à peu près parité de valeur entre l'altitude de ces cimes culminantes et la plus grande profondeur des mers (9 500 mètres dans le Pacifique). Si le relief des continents était uniformément réparti sur toute leur surface, l'altitude moyenne de la terre ferme serait d'environ *sept cents mètres*. Quant à la profondeur moyenne des mers, elle est d'à peu près *quatre mille mètres*, de telle sorte que le volume total de la masse océanique (en tenant compte des superficies réciproques) est égal à environ

quinze fois celui des terres émergées. Néanmoins, si l'on réfléchit qu'une profondeur de 4 000 mètres ne représente que la *seize-centième* partie du rayon terrestre, on aura le droit d'en conclure que, malgré son importance relative, la nappe océanique ne forme en réalité qu'une mince enveloppe au-dessus de la partie solide du globe, dont la surface diffère peu, par conséquent, de celle de l'océan. D'ailleurs, en vertu des lois de l'équilibre d'une masse fluide soumise à un mouvement de rotation, la surface libre des mers, sollicitée par la force centrifuge, est aplatie au pôle et renflée à l'équateur où elle fait, au-dessus d'un globe idéal supposé sphérique, une saillie évaluée à 21 kilomètres, soit à peu près un *trois-centième* du rayon.

Il résulte donc de la coïncidence signalée que la terre ferme, elle aussi, affecte une *figure d'équilibre*, et comme une telle figure est le privilège des corps fluides, cela donne une grande probabilité à l'hypothèse d'après laquelle notre globe aurait traversé un état initial de fluidité.

Complication des continents. — La répartition des détails du relief est aussi très intéressante à étudier. Il s'en faut de beaucoup que ce qu'on appelle un *continent* soit une unité homogène, où l'altitude croisse régulièrement depuis les rivages maritimes jusqu'à une partie centrale culminante, formant soit un massif, soit une arête allongée. C'est ce dont il est aisé de se rendre compte en consultant, non plus les anciennes cartes géographiques, où les lignes de relief étaient figurées très arbitrairement par des hachures de convention, mais les cartes *hypsométriques* des nouveaux atlas, où des courbes de niveau réunissent tous les points de même altitude, en même temps que les zones d'égal relief moyen sont accusées par une teinte uniforme.

Si l'on procède ainsi pour l'Europe, par exemple, on verra que ce continent débute, dès le détroit de Gibraltar, par un plateau de 700 mètres d'altitude moyenne, le plateau ibérique, dont la partie culminante est justement appuyée au rivage méditerranéen, si bien que, pendant quelque temps, la *ligne de partage des eaux*, entre l'Atlantique et la Méditerranée, est obligée de suivre presque exactement ce rivage. Ensuite, cette

ligne côtoie le bord oriental du plateau espagnol, jusqu'à ce qu'elle ait réussi à atteindre les Pyrénées, dont elle épouse la crête jusqu'à l'Ariège. Mais alors il faut que, à côté des Corbières, elle vienne errer, en quelque sorte, dans la dépression par laquelle le bassin atlantique se relie sans difficulté avec celui de la Méditerranée. Quand elle a franchi le col, elle voit la masse des Cévennes se dresser au-devant d'elle; mais c'est moins une chaîne proprement dite que le bord extrême et culminant du plateau central de la France, grand massif haut de 600 mètres en moyenne et se relevant de plus en plus vers le sud-est. La ligne de partage en suit le bord et continue de là jusqu'en Lorraine, non pour atteindre la crête des Vosges, mais pour passer, au pied de ces montagnes, dans un col qui la conduit enfin au Jura. Mais à peine a-t-elle suivi quelque temps le faîte de cette chaîne qu'elle descend brusquement dans l'insignifiante dépression qui sépare le lac de Genève de celui de Neuchâtel, c'est-à-dire le bassin de la Méditerranée de celui de la mer du Nord.

Alors seulement la ligne de partage pénètre dans les grandes Alpes, mais pour les abandonner bien vite et chercher, comme à l'aventure, un chemin mal défini entre le lac de Constance et le Danube; après quoi son parcours continue, capricieux et compliqué, au sud de la Franconie et de la Bohême, et trouve tout juste un passage entre la source de l'Oder et les affluents du Danube. Puis, ayant longé les Carpathes, elle vient définitivement s'évanouir dans le grand plateau russe, au milieu de ces marécages où, suivant l'abondance ou la direction des pluies, l'eau pourrait s'écouler tantôt dans la Baltique, tantôt dans la mer Noire. Pendant ce temps, le grand arc formé par les Alpes, les monts de Bohême et les Carpathes enferme, en quelque sorte, les eaux danubiennes dans le bassin plat de la Hongrie, où elles pénètrent en forçant un véritable défilé, pour s'échapper à l'autre bout par une coupure plus étroite encore, celle des Portes de Fer.

Ainsi, au lieu d'un relief central nettement défini, envoyant à droite et à gauche des contreforts, comme des membres qui se détachent d'un tronc commun, nous voyons partout des massifs largement étalés, ou des bassins plats qu'entourent

de hautes chaînes, souvent rompues par les cours d'eau aux points où il semble qu'il ait dû être le plus difficile de les franchir. En résumé, le continent européen s'offre à nous comme un ensemble compliqué, morcelé, portant la trace évidente de mille actions successives, et l'on devine que ses traits particuliers, souvent contradictoires, ne peuvent se justifier que par la connaissance de la série des événements antérieurs; absolument comme l'histoire de la formation d'un peuple peut seule donner la clef de ses particularités physiques et morales, dont chacune est un héritage du passé.

Situation des lignes de relief; sa signification. — Il faut ajouter que rarement on observe un passage graduel entre les plaines et les montagnes. Comme les Pyrénées au-devant de la plaine aquitanienne, comme le Jura en face de la plaine suisse, les Alpes en face de la plaine lombarde, les monts Scandinaves devant la mer du Nord, l'Himalaya au nord du plateau indien, etc., les montagnes surgissent d'ordinaire brusquement, sous la forme de chaînes alignées dont un versant est en général plus raide que l'autre. De plus, au lieu de se trouver au milieu des continents, elles en occupent plus souvent les bords, faisant directement face, soit à l'océan, soit à une dépression marquée.

Ainsi la Sierra Nevada, la chaîne la plus élevée de l'Espagne, est en quelque sorte collée contre le rivage méditerranéen. Les Pyrénées, si progressivement préparées du côté espagnol, se dressent comme une muraille abrupte en face de la dépression aquitanienne. Le Jura est formé d'une série de chaînons parallèles d'altitude croissante, dont le plus élevé domine comme une falaise la plaine suisse. Le plateau central de la France, si doucement incliné vers l'ouest, se relève constamment, comme nous l'avons déjà dit, au sud-est, où son bord forme la chaîne des Cévennes, surgissant brusquement au-dessus de la dépression qu'arrose le Rhône.

La même loi gouverne le relief du fond des mers. Les îles, qui ne sont autre chose que les sommets de montagnes en partie submergées, forment aussi des chaînes, aux versants assez abrupts, limitant des portions particulièrement déprimées du lit de l'océan. Telles sont les Antilles, les Aléou-

tiennes et la plupart des îles de la Polynésie. Si les portions que ces chaînes entourent venaient à se soulever en masse, la terre ferme s'enrichirait de nouveaux territoires, limités par des bourrelets montagneux, et en tout semblables à ces plaines de l'Asie, dont le fond est occupé par des lacs sans écoulement, tandis que les hautes chaînes de l'Himalaya, du Kouen-Lun et du Tien-Chan en définissent les limites.

Une telle similitude de constitution semble autoriser l'idée d'une commune origine, d'autant plus que les lacs des dépressions continentales se révèlent, par leur salure, comme d'anciens bassins maritimes. Par là on se trouve conduit à penser que la formation de la terre ferme a dû être progressive, chaque continent s'agrandissant par l'émersion des fonds de mers voisins. De cette manière, toute la surface terrestre pourrait être comparée à une sorte de marqueterie, composée de compartiments plats, dont le centre aurait fléchi, tandis que des dislocations d'allure rectiligne en relevaient brusquement les bords.

En même temps, des écroulements devaient se produire, qui faisaient disparaître d'anciennes terres émergées, donnant naissance à des océans tels que l'Atlantique, dont les rivages, par opposition avec ceux du Pacifique, ne sont bordés par aucune ligne de hauteurs.

Mais avant de voir jusqu'à quel point cette conception est justifiée par la structure intime de l'écorce, il importe de poursuivre l'examen des formes actuelles du globe, en étudiant les conditions qui déterminent leur variabilité.

§ 4

LES CONDITIONS PHYSIQUES A LA SURFACE DU GLOBE

Principe de la variabilité des conditions physiques. — La terre ferme et ses enveloppes fluides, c'est-à-dire l'atmosphère et l'océan, ne restent pas en présence comme des masses inertes. D'un côté, chacun de ces milieux est le siège

de réactions spéciales, par suite desquelles la vie y devient possible; de l'autre côté, sous l'influence d'une énergie extérieure, celle du soleil, les enveloppes mobiles se précipitent à l'assaut de la terre ferme, dont elles modifient perpétuellement la forme.

Le principe de cette attaque réside dans les différences de température qui se produisent entre les différentes parties de l'atmosphère ou de l'océan, et y déterminent des mouvements destinés à rétablir l'équilibre troublé.

Grâce à la variété que présentent à cet égard les diverses parties de la surface, un perpétuel échange d'activité, d'allure constamment variable, se fait entre les quatre éléments fondamentaux dont on peut dire que notre globe est constitué : la *terre*, support de tous les êtres et réservoir des substances qui leur sont nécessaires; l'*air*, précieux régulateur des conditions physiques auxquelles la vie est subordonnée; l'*eau*, véhicule indispensable de toutes les réactions; enfin le *feu*, c'est-à-dire la chaleur solaire, principe de l'énergie qui se dépensera en transformations de toutes sortes.

Répartition de la lumière et de la chaleur solaires. Saisons. — Puisque tout dérive de l'énergie, et que celle-ci a pour source extérieure le soleil, c'est de la répartition de la chaleur solaire qu'il faut d'abord s'occuper.

Si l'axe des pôles était à angle droit sur le plan de l'orbite terrestre ou écliptique, chaque point du globe, pendant le mouvement de rotation diurne, passerait douze heures dans l'hémisphère éclairé et autant dans l'autre. Le jour serait donc partout égal à la nuit.

En outre, en chaque point, les rayons solaires, qui peuvent être considérés comme parallèles, rencontreraient la terre à midi suivant une direction d'autant plus oblique qu'on s'approcherait davantage des pôles, où ces rayons seraient toujours *rasants*. Or la lumière, et la chaleur qui l'accompagne, étant d'autant plus vives que les rayons solaires sont moins inclinés sur la surface, le globe se partagerait en cinq zones : une *zone torride* ou équatoriale, avec rayons tombant d'aplomb toute l'année à l'équateur et presque d'aplomb sur les parallèles voisins; deux zones *tempérées*, avec inclinaison moyenne

des rayons; enfin, près des pôles, deux zones *froides*, les rayons rasants ne donnant que très peu de chaleur. Les différences de température entre ces diverses zones seraient d'ailleurs beaucoup moins sensibles qu'elles ne le sont actuellement; et, de plus, elles demeureraient sans changement appréciable pendant tout le cours de l'année.

Mais l'axe terrestre est incliné d'une quantité notable (fig. 1) et, par suite, le grand cercle d'illumination ne coïncide pas avec un méridien. Aussi, à l'exception de deux moments de l'année, appelés *équinoxes*, partout, sauf à l'équateur, les durées relatives du jour et de la nuit sont-elles inégales.

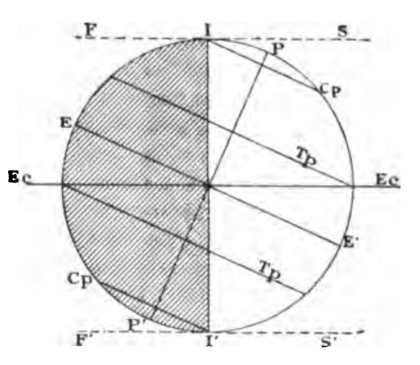


Fig. 1. — Effets de l'inclinaison de l'axe des pôles lors d'un solstice. — FS, F'S', limite du faisceau des rayons solaires; II', grand cercle d'illumination; Ec, écliptique; EE', équateur; Tp, tropiques; Cp, cercles polaires.

Ce n'est donc plus seulement par la différence dans le degré de la température que les zones terrestres se distinguent. La zone équatoriale est celle où la durée du jour diffère peu de celle de la nuit et où, deux fois par an, chaque point voit à son tour, à l'heure de midi, le soleil passer au zénith. Les zones tempérées sont exposées à connaître, tantôt de longs jours, tantôt de longues nuits, mais toujours de moins de vingt-quatre heures. Enfin, dans les zones froides, devenues les zones *glaciales*, le contraste s'accentue, depuis les cercles polaires, où une seule nuit dure vingt-quatre heures, jusqu'aux pôles mêmes, pour lesquels six mois d'un soleil blafard et rasant succèdent à six mois de nuit complète. En outre, par le fait de la révolution annuelle, la différence, variant d'une manière continue, change de sens tous les six mois.

C'est ainsi que, grâce à l'obliquité de l'axe terrestre, et

dans une mesure qui dépend du degré de cette inclinaison, se produit le jeu des *saisons*, par suite duquel chaque hémisphère est, tour à tour, favorisé, puis disgracié sous le rapport de la lumière et de la chaleur. Peu sensible entre l'équateur et les tropiques, l'influence des saisons devient de plus en plus marquée à mesure qu'on s'élève vers les pôles. Par elle, l'année se trouve partagée dans les hautes latitudes en deux phases, dont l'une est caractérisée par l'activité des phénomènes physiques de tout ordre, tandis qu'à l'autre correspond un repos presque complet de la nature.

Zones de climats; leur irrégularité. — Si la surface du globe offrait partout une égale distribution des deux éléments, liquide et solide, rien ne troublerait l'uniformité des zones de climats. Chacune d'elles s'étendrait sans irrégularités d'une extrémité du monde à l'autre, et les lignes menées par tous les points de la terre en possession d'une même température moyenne annuelle, c'est-à-dire les *isothermes*, seraient partout des cercles, exactement parallèles à l'équateur.

Il n'en est pas ainsi, et cela pour plusieurs raisons. D'une part, à mesure qu'on s'élève, l'air se raréfie, devient plus sec et est de moins en moins apte à absorber la chaleur solaire pour en faire profiter les corps qu'il baigne, perdant ainsi, dans nos régions, à peu près un degré centigrade par 170 mètres. Par suite, les districts continentaux de grande altitude ont une température notablement inférieure à celle qui règne, au niveau de la mer, sur le même parallèle de latitude. D'autre part, la terre ferme s'échauffe et se refroidit plus vite que la mer, ce qui introduit, à latitude égale, une différence sensible entre l'intérieur des continents et leurs rivages. Enfin, dans les pays sujets aux chutes de neige, le blanc manteau qui en hiver séjourne sur le sol paralyse, à l'égard de ce dernier, l'action bienfaisante du soleil. Aussi, dans ces contrées, la terre ferme agit-elle en *exagérant* les différences entre l'hiver et l'été, tandis que, sur l'océan et dans son voisinage immédiat, l'élément liquide intervient au contraire comme un *régulateur*, absorbant à l'état latent une partie de la chaleur du jour ou de l'été, pour la restituer ensuite, par le mécanisme de la condensation, dans la nuit ou pendant la saison froide.

De là vient qu'il y a des îles, comme Madère, où règne une température à peu près exempte de tous autres changements que les variations diurnes, alors que certains pays continentaux, tels que l'intérieur de la Russie, voient, dans le cours d'une année, la température moyenne mensuelle s'élever ou s'abaisser de *vingt-cinq* à *trente degrés*.

Rôle des courants. — Ce n'est pas tout. Lorsque, dans une masse fluide, que ce soit l'air ou l'eau, des différences de température se produisent, il s'établit aussitôt des courants, *courants atmosphériques* et *courants marins*, qui tendent à rétablir l'équilibre. Si quelques-uns de ces courants, ceux qui règnent dans la zone équatoriale, sont à peu près indépendants de la répartition des terres et des mers, il en est autrement dans les latitudes tempérées, où l'influence exercée par les continents sur le transport des masses fluides (influence qui parfois change avec les saisons) est souvent assez forte pour modifier profondément les conditions normales du climat. Par exemple, le *Gulf-Stream*, ce fleuve d'eau chaude issu du Golfe du Mexique, où les eaux de l'Atlantique, poussées par les vents alizés, se concentrent et s'échauffent comme dans une vaste chaudière, pour s'échapper ensuite avec une grande vitesse par le détroit de Bahama, le Gulf-Stream, disons-nous, contribue à adoucir considérablement le climat de l'Europe septentrionale. Au contraire, certains courants froids, qui longent les côtes américaines, y contre-balancent en quelques points l'effet d'une température tropicale. De même il y a des courants d'air sec assez puissants pour assujettir au régime des déserts jusqu'à certaines îles situées en plein océan.

Répartition de la vie. Variété des formes vitales. — Par suite des différences qui viennent d'être signalées, le globe, *tel qu'il est aujourd'hui*, c'est-à-dire pourvu d'un relief très inégal et d'une grande complication dans les contours océaniques, offre une extrême variété de conditions physiques. Et comme ces conditions, degré de chaleur, variations plus ou moins brusques et plus ou moins étendues de la température, abondance plus ou moins grande de l'humidité, etc., sont ce qui influe par-dessus tout sur le monde organique, animal ou végétal, la vie revêt à la surface des continents, comme

dans les mers, une infinie variété de formes. Le monde se partage donc en *provinces*, *botaniques* ou *zoologiques*, les unes *terrestres*, les autres *marines*, dont chacune est caractérisée par un ensemble de formes qui lui sont propres.

Faunes marines littorales; faune abyssale. — Toutefois, en ce qui concerne les animaux marins, cette diversité organique ne se manifeste que sur les espèces de surface, celles qui vivent près du rivage, composant ce qu'on appelle les *faunes littorales*. Tout autre est la population des grandes profondeurs, au-dessous d'une couche superficielle peu épaisse, qui seule ressent les variations de la chaleur extérieure. Là règne une température uniforme qui, dans les océans largement ouverts, est voisine de zéro, parce que l'eau froide des pôles, plus lourde, descend et afflue librement sur le fond. Dans ce milieu exempt de toute agitation, où la lumière du soleil ne pénètre pas, une faune spéciale se développe, indépendante des latitudes; c'est la faune des abîmes ou *abyssale*, aussi monotone que les faunes littorales sont riches et variées.

Un tel contraste est frappant et sa signification s'accentue encore, quand le zoologiste nous apprend à reconnaître, parmi les formes abyssales, bon nombre de types étroitement alliés à des espèces disparues, qu'on ne retrouve plus qu'à l'état fossile. C'est une raison pour penser que la diversité actuelle des conditions extérieures n'a pas toujours existé, et qu'elle n'a cessé de se prononcer durant le cours des âges, pour atteindre, avec l'époque où nous sommes, son plus haut degré de complication.

Espèces isolées, espèces disjointes. Conclusion. — En tout cas, les faunes et les flores de surface du temps présent abondent en espèces *isolées*, c'est-à-dire dépourvues de tout lien avec les types organiques contemporains, au milieu desquels elles semblent dépaysées, tandis qu'elles forment la suite naturelle et comme le dernier anneau d'une chaîne d'antécédents fossiles. Quand de ce fait on rapproche celui des espèces *disjointes*, c'est-à-dire cantonnées aujourd'hui dans des districts déterminés, sans qu'on en observe aucune trace dans les régions intermédiaires, il devient difficile d'échapper à cette conclusion : que le monde actuel n'est pas une unité homo-

gène; que les groupes organiques, aussi bien que les détails du relief, y sont loin d'avoir tous la même antiquité; en un mot, que l'état de choses au milieu duquel nous vivons est la *résultante* d'une longue suite de transformations, dont chacune a laissé à la surface une empreinte plus ou moins reconnaissable.

Par quel mécanisme ces transformations se sont-elles effectuées? C'est ce que nous pouvons espérer de découvrir, en dirigeant notre attention vers les changements dont nous sommes chaque jour témoins.

CHAPITRE II

DYNAMIQUE TERRESTRE EXTERNE

§ 1

DÉFINITION DE LA DYNAMIQUE TERRESTRE

Stabilité apparente des formes du globe. — Quand on jette un coup d'œil sommaire sur le monde qui nous entoure, la première impression qui s'en dégage semble être celle de la *stabilité* des formes et des conditions extérieures.

Le paysage autour de nous paraît immuable, ne subissant d'autres changements que ceux dus à la culture ou aux constructions élevées de main d'homme. Les contours déchiquetés des Aiguilles des Alpes sont absolument tels que les a dessinés Saussure, et si l'histoire des montagnes a plus d'une fois enregistré des éboulements considérables, l'importance de ces phénomènes paraît négligeable, à côté de la masse qu'ils ne modifient que par d'insignifiants détails. A peine remarque-t-on, sur certains points, une différence entre les rivages maritimes actuels et ceux dont les anciens géographes nous

ont transmis la description. Chaque année les mêmes époques ramènent des conditions identiques de température. Enfin, quand la tradition nous parle de changements survenus à la longue dans le climat de quelques contrées, tantôt l'intervention de l'homme suffit à les expliquer, tantôt il paraît légitime d'y voir des modifications passagères, produites par des causes périodiques, dont le retour régulier doit provoquer la répétition indéfinie des mêmes phénomènes.

Universalité des actions dynamiques. — Cependant cette impression n'est qu'une trompeuse apparence, qui tient à la brièveté de la vie humaine, comparée à la lenteur des changements en voie d'accomplissement. Tout se meut autour de nous, même dans les milieux qui semblent le plus inactifs. Partout les forces mécaniques, physiques et chimiques sont à l'œuvre, modifiant les conditions de l'écorce pour produire à chaque instant de nouveaux états d'équilibre, bientôt destinés à disparaître pour faire place à d'autres. Deux catégories de forces ou *agents dynamiques* s'emploient à cette transformation; les unes sont extérieures à notre globe et forment ce que nous appellerons le jeu de la *dynamique terrestre externe*; les autres ont leur siège dans les profondeurs de l'écorce, et leur ensemble constitue la *dynamique terrestre interne*. Il convient d'examiner l'un après l'autre ces deux ordres de faits.

Principe fondamental de la dynamique externe. — Le principe essentiel de la dynamique externe réside dans la *chaleur solaire*. C'est cette chaleur qui vaporise l'eau des océans et la fait passer à l'état de vapeur dans les masses atmosphériques, d'où elle se précipite en pluie sur la terre ferme, entraînant au passage tous les matériaux meubles qu'elle peut déplacer. C'est elle qui fait naître les vents et lance à l'assaut des rivages les vagues de la mer. C'est elle enfin qui permet, à la surface du globe, l'accomplissement des réactions de toute nature, par lesquelles la consistance et la composition de l'écorce superficielle sont incessamment modifiées.

D'une manière générale, on peut donner de la dynamique externe la définition suivante : c'est la *réaction exercée sur l'écorce solide, à la faveur de la chaleur du soleil, par les éléments fluides extérieurs*, atmosphère, océan et eaux courantes. Par

l'effet de cette réaction, les matériaux de la terre ferme perdent leur cohésion et retombent sous l'action de la *pesanteur*, qui les met en mouvement jusqu'à ce qu'ils aient conquis *une meilleure situation d'équilibre*, en se rapprochant du centre commun d'attraction.

§ 2

ACTION DE L'ATMOSPHÈRE

Désagrégation des roches. Dunes. — Sous l'influence des variations de la température et, mieux encore, par suite des alternatives de sécheresse et d'humidité, la surface du sol, même lorsqu'elle est rocheuse, se désagrège, éclate et se réduit en menus fragments, que le vent devient capable de déplacer. Quand ces fragments sont formés d'une matière suffisamment dure pour pouvoir, au delà d'un certain degré de division, résister à l'usure (ce qui est le cas des sables à grains de quartz), les courants atmosphériques les ballottent, jusqu'à ce qu'ils les aient amoncelés dans des vallées ou des dépressions à fond plat. A partir de ce moment, si le climat est assez sec pour que la pluie ne les entraîne pas, le vent se contente de remanier la superficie de ces accumulations, en y faisant naître une multitude de monticules instables qu'on appelle des *dunes*. Dans le Sahara, les dunes peuvent atteindre 200 mètres de hauteur et leur mobilité est justement redoutée par les caravanes. Les sables y sont siliceux et d'un grain remarblement uniforme.

Les plateaux sur lesquels les grains quartzeux doivent cheminer, avant d'arriver aux dunes, prennent un poli caractérisé; dans les défilés, le sable en mouvement burine les roches et parvient à y creuser de vrais sillons, même des trous cylindriques.

Dunes maritimes. — Des dunes se forment aussi sur les rivages de la mer, quand la côte est plate, que le jeu de la marée est sensible et que le vent du large soulève les sables de la plage, desséchés à mer basse par les rayons du soleil, pour les accumuler en monticules à la faveur du moindre obstacle.

Il peut sembler, au premier abord, que ces *dunes maritimes* échappent à la formule générale de la dynamique externe; car elles résultent d'un travail opposé à l'action de la pesanteur. Mais, d'une part, le déplacement que subissent les sables, soit en distance, soit en hauteur, est toujours peu considérable et, d'autre part, ce qu'il importe de ne pas méconnaître, c'est le rôle protecteur que jouent les barrières de sable, en limitant l'action de la vague et en empêchant la mer de pénétrer, lors des grandes marées, sur la portion de l'ancien rivage abritée par ce *cordon littoral* de dunes. Cette portion, auparavant exposée à d'incessants remaniements, est désormais défendue contre toute destruction. Son sol se consolide; ses dépressions se comblent et se colmatent peu à peu par l'apport des cours d'eau voisins, et ainsi la terre ferme, c'est-à-dire l'élément stable, reçoit un nouvel accroissement, profitable à la cause générale de l'équilibre.

Lorsque les dunes maritimes ont atteint une hauteur assez grande pour que la force du vent ne permette plus aux grains de sable d'en franchir la crête, elles deviennent à peu près stables et peuvent être définitivement fixées par la végétation. Le phénomène des dunes n'est donc pas permanent et son développement, en chaque point, dépend du temps qui a pu s'écouler depuis l'établissement des rapports actuels de la terre ferme et de l'océan.

En outre il convient de remarquer que les dunes, maritimes ou continentales, étant l'œuvre du vent, leur formation est nécessairement intermittente; car une seule tempête peut y apporter plus de changements qu'une longue suite de jours ordinaires.

§ 3

ACTION DES EAUX COURANTES

Principe des précipitations atmosphériques. — Le travail de désagrégation que produisent les influences atmosphériques ne donne naissance à des dunes que quand le vent est particulièrement fort ou que la sécheresse du climat est excep-

tionnelle. Dans tout autre cas, ce travail a surtout pour effet d'ameublir l'écorce solide et, par là, de la rendre accessible à l'action des eaux courantes, l'instrument de beaucoup le plus efficace de la dynamique externe.

Le principe de cette action réside dans les *précipitations atmosphériques*, c'est-à-dire dans la condensation de la vapeur répandue au sein de l'atmosphère. L'air qui s'est chargé de vapeur d'eau au-dessus des mers tropicales est emporté par les courants atmosphériques vers des latitudes plus hautes; ou encore, après s'être saturé au niveau de l'océan, il est contraint, par la direction du vent, de s'élever pour franchir une chaîne de hauteurs. Dans l'un comme dans l'autre cas, il subit un refroidissement plus ou moins notable, et comme la quantité de vapeur qui peut exister dans l'air dépend de la température, tout ce qui, à un moment donné, dépasse le maximum admissible, doit se *précipiter*, sous la forme de *pluie* ou de brouillard si l'air est au-dessus de zéro, sous celle de *neige* ou de givre s'il est au-dessous. Laissant de côté, pour y revenir bientôt, la part des neiges, occupons-nous de ce que devient le produit des pluies.

Chutes de pluie. — L'intensité de la pluie est essentiellement variable suivant les régions. En moyenne, il tombe en Europe, chaque année, 575 millimètres d'eau dans les plaines et 1 300 millimètres dans les districts montagneux. La chute de pluie s'élève à 2 mètres le long de la côte de Norvège. Mais c'est bien autre chose sur le flanc méridional de l'Himalaya, où certaines localités reçoivent jusqu'à *quinze mètres* d'eau par an.

Ces différences ne tiennent pas seulement à l'inégale richesse en vapeur d'eau des courants d'air et au refroidissement que ceux-ci éprouvent au contact des montagnes. Une grande part de l'effet produit est due au relief lui-même et au travail que l'air est obligé d'accomplir pour franchir les chaînes qui lui barrent le passage. En s'élevant l'air se dilate; par ce seul fait, en vertu des lois de la physique, il perd une notable quantité de chaleur, ce qui entraîne une condensation correspondante de vapeur. De cette manière, la pluie est d'autant plus abondante que l'obstacle opposé aux vents humides est à la

fois plus élevé et plus brusque. Ainsi le relief antérieurement acquis par le sol n'agit pas seulement sur la direction des courants d'air et sur leur richesse en humidité; il influe aussi d'une manière remarquable sur l'abondance des pluies et, par contre-coup, sur la puissance mécanique des cours d'eau qui en résulteront.

On évalue aujourd'hui, réduite en eau, à environ 120 000 kilomètres cubes, la quantité de précipitations atmosphériques que reçoit chaque année la terre ferme. Régulièrement étalée sur cette dernière (dont la superficie est de 145 millions de kilomètres carrés), cette quantité formerait une couche d'eau de 844 millimètres d'épaisseur.

Or on peut admettre que le volume de la terre ferme, c'est-à-dire de la partie émergée de l'écorce, est d'environ 100 millions de kilomètres cubes. Par conséquent, l'instrument liquide employé à l'attaque de cette terre ferme en représente à peu près, en volume, la *huit-centième partie*; d'un autre côté, c'est environ *un douze mille cinq-centième* de la masse océanique qui prend part à l'attaque.

Partage du produit des pluies. Ruissellement. Érosion. — Une partie de la pluie qui tombe retourne immédiatement dans l'atmosphère par *évaporation*. Ce facteur, d'une efficacité très variable suivant les saisons et les latitudes, suffit, dans les régions tempérées, pour enlever chaque année entre les deux tiers et les trois quarts de la pluie tombée.

Le reste *s'infiltre* dans le sol, si ce dernier est *perméable*, ou *ruisselle* à la surface, si le terrain est *imperméable* ou encore si la pente est trop forte.

L'eau courante possède un pouvoir mécanique qui dépend à la fois de sa masse, de sa vitesse (cette dernière étant déterminée par la pente), et de la quantité des pierres charriées. Elle excelle à entraîner les matériaux meubles et à remanier les roches solides que la gelée et la sécheresse ont préalablement réduites en fragments, soit en y ouvrant des fentes de retrait, soit en élargissant les fissures naturelles. Même en roche dure, un courant d'eau creuse son lit quand sa vitesse atteint 4 mètres par seconde. Aussi, dans beaucoup de pays, le terrain subit-il, par l'action prolongée des pluies, une *éro-*

sion qui donne lieu à des apparences remarquables, piliers isolés, arcades naturelles, pyramides de terre (fig. 2), etc. Avec les sables dont certaines parties sont agglomérées en grès, l'isolement des blocs de grès, par entraînement du sable environnant, et leur chute sur les flancs des vallées, font naître



Fig. 2. — Arcade naturelle et pyramides d'érosion dans le bassin du Rio Grande (d'après Hayden).

des paysages pittoresques, dont la forêt de Fontainebleau offre un exemple bien connu.

Torrents. — Le ruissellement s'exerce avec une intensité particulière dans les pays de montagnes, où le sol se montre partout sillonné de ravinements.

Lorsque le terrain est disposé de manière à faire converger

vers un même point de nombreuses rigoles, leur réunion donne naissance à un *torrent*. C'est un cours d'eau violent, mais éphémère, très souvent à sec, mais capable de débiter en quelques heures une masse d'eau comparable à celle des fleuves, avec une vitesse qui la rend apte aux plus grands effets mécaniques. Les eaux torrentielles, concentrées dans un *bassin de réception* en forme de *cirque*, s'écoulent d'habitude par un étroit *couloir*, dont elles ne cessent de dégrader les parois, tant par leur choc que par celui des matériaux qu'elles déplacent, en provoquant de nombreux éboulements. Mais leur vitesse s'amortit subitement au débouché du couloir dans la vallée principale, et alors les matières solides charriées par le torrent se déposent en formant un amas conique plus ou moins confus, mélange de blocs anguleux, de galets, de graviers et de boues, qu'on nomme *cône de déjection* (fig. 3). Ainsi tout torrent se compose de trois parties : l'une supérieure, où se fait sentir l'*érosion* produite par les *eaux sauvages*; la seconde, moyenne, où domine l'*affouillement*, œuvre du cours d'eau concentré dans son couloir; la troisième, inférieure, région de *dépôt*, où le torrent édifie un cône avec les matériaux qu'il a entraînés.



Fig. 3. — Cône de déjection torrentiel.

A mesure que le cône s'allonge, le torrent se ménage à la surface un lit variable. Mais les progrès de l'affouillement, joints à l'allongement du cône, ont pour effet de réduire peu à peu la pente du cours d'eau et, par suite, de diminuer sa puissance mécanique. Aussi tout torrent laissé à lui-même arrive-t-il, au bout d'un temps plus ou moins long, à une sorte d'équilibre, qui permet à la végétation de prendre pos-

session de ses rives. Tandis que les arbres consolident le sol par leurs racines, l'herbe oblige l'eau des pluies à s'écouler par mille filets sans pouvoir se concentrer. Le travail d'érosion s'arrête et le torrent est fixé. Du moins, dans son existence éphémère, a-t-il contribué à faire arriver dans les vallées, c'est-à-dire dans une situation d'équilibre plus stable, des matériaux que la pesanteur seule n'eût jamais réussi à y amener.

D'ailleurs cette action aura été essentiellement intermittente, ne s'exerçant que lors des grandes pluies et toujours pendant un temps très court, dont la brièveté contraste avec l'intensité des effets produits.

Deltas torrentiels. — Lorsqu'un torrent débouche dans un

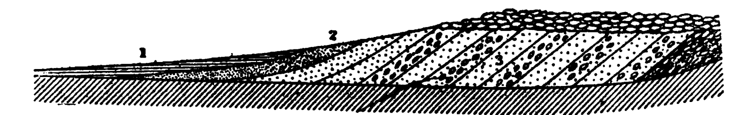


Fig. 4. — Coupe d'un delta torrentiel. — 1, limon; 2, sable fin; 3, graviers 4, couronnement de galets.

lac, sa vitesse étant immédiatement amortie, les cailloux et graviers tombent dès l'embouchure et se stratifient en formant un talus plus ou moins raide. Par suite des progrès de ce talus, les couches inclinées de gravier vont s'ajoutant les unes aux autres en continuant à empiéter sur le lac. Mais les plus gros blocs, moins faciles à entraîner, se déposent, un peu avant l'embouchure, sur la crête du talus, laquelle s'avance d'ailleurs progressivement. Ainsi se constitue un amas de graviers en couches inclinées, avec couronnement horizontal de cailloux roulés, qu'on appelle *delta torrentiel* (fig. 4). Le cordon de gros cailloux indique avec certitude le niveau du lac au moment de la formation de ce delta.

Phénomènes d'affouillement. — Si, en raison de la pente du sol, le ruissellement est général dans les montagnes, il s'exerce aussi d'une façon normale dans les pays peu accidentés, toutes les fois que le sol est *imperméable*, ce qui est le cas des roches argileuses. Privée de la faculté de s'infiltrer,

l'eau ruisselle à la surface, creusant partout, lors des averses, des rigoles dont elle dégrade les bords. En quelques heures, le produit des pluies parvient aux cours d'eau principaux et occasionne le débordement, violent et rapide, d'une eau limoneuse.

Les rivières soumises à ce régime, ainsi que les cours d'eau dont la pente, sans être celle d'un véritable torrent, est assez sensible pour donner à l'eau une vitesse suffisante (ce qui est réalisé quand l'inclinaison du lit dépasse 3 p. 1000), exercent sur leur versants une action mécanique appréciable. Le choc de l'eau fait ébouler les berges par tranches successives, et ainsi se creuse, dans le terrain, une entaille en forme de V, qui va s'élargissant à mesure que sa pointe descend. Ce travail de creusement ne s'arrête que quand, par suite de son progrès, la pente du lit est devenue assez faible pour que l'eau courante ne dégrade plus ses berges. D'autre part, pendant que le creusement est en cours, la pointe du V doit s'aplatir, parce que l'impétuosité des eaux ne leur permet pas de suivre un chenal constant, de sorte qu'elles se jettent tantôt à droite, tantôt à gauche, n'occupant toute la largeur du lit que dans les grandes crues. Cette largeur est donc réglée à fois par le débit normal et par les déplacements du cours d'eau.

Profil d'équilibre. Régime. — Le terme de cette première phase est l'acquisition par la rivière d'un *profil d'équilibre*, c'est-à-dire que la pente du lit, supposé dans un même plan vertical, est exprimée par une courbe continue, sans ressauts, à courbure progressivement croissante de l'aval à l'amont. Cette régularisation s'opère par le bas, en raison du *niveau de base*, supposé fixe, que fournit l'embouchure de la rivière, et progresse peu à peu en remontant (fig. 5).

La pente doit être exactement nulle au débouché du cours d'eau dans la mer ou dans un lac, puisqu'en ce point il n'y a plus de vitesse. A partir de là, elle augmente avec une lenteur extrême, pour ne devenir tant soit peu sensible que dans le voisinage de la région des sources, où la masse d'eau est très faible. C'est ainsi qu'à Paris, à plus de 300 kilomètres de son embouchure, la Seine n'a déjà plus qu'une pente *d'un mètre par dix mille mètres.*

Une fois la pente réduite, une nouvelle phase commence et la rivière devient *divagante*, c'est-à-dire que, insuffisante pour occuper habituellement toute la largeur de son ancien lit ou *lit majeur*, elle s'y trace un lit moins large ou *lit mineur*, dont la situation dans la vallée est instable. Cette instabilité persiste jusqu'à ce que, par les méandres de son lit mineur, la rivière ait *allongé son parcours*, assez pour que, en moyenne, la résistance offerte au mouvement par le frottement du fond soit égale à la force du courant. Alors la rivière devient stable.

Quand un cours d'eau a cessé de divaguer, on dit qu'il est *à l'état de régime*. Son lit ne subit plus que des déplacements

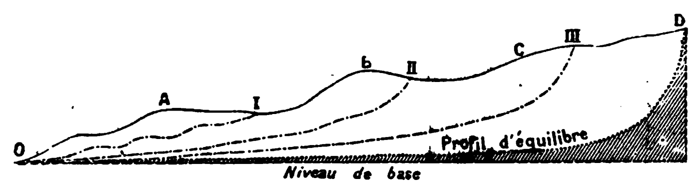


Fig 5. — La ligne sinueuse A B C D représente le profil originel du terrain O I, O II, O III sont les positions successivement occupées par le lit du cours d'eau avant l'acquisition de son profil d'équilibre. — Le *niveau de base* est le niveau de la mer ou du lac où le cours d'eau débouche en O.

insignifiants et les eaux ne le dépassent que lors des crues, dont la fréquence et l'intensité varient d'ailleurs avec l'abondance des pluies, le degré d'imperméabilité du terrain et le caractère particulier des affluents.

Particularités de l'érosion. — Le travail d'affouillement ou d'*érosion* qu'accomplissent les eaux courantes ne doit pas être comparé à l'œuvre de la goutte d'eau qui creuse la pierre par ses chocs répétés. La division des roches a été préparée de longue date par les cassures naturelles, les fentes de retrait, les infiltrations, la gelée, etc. L'eau courante se contente généralement de *débiter* les roches ainsi divisées et de les faire écrouler en emportant leurs débris. Si elle creuse son lit, c'est en raison de la hauteur de chute dont elle dispose entre sa source et son embouchure, hauteur qui, au lieu de se répartir sur toute la longueur par une pente uniforme, tend à se concentrer le plus près possible de l'origine du cours.

d'eau, jusqu'à ce que le principal effort se dépense dans une seule cascade, précédant un long parcours à pente insensible

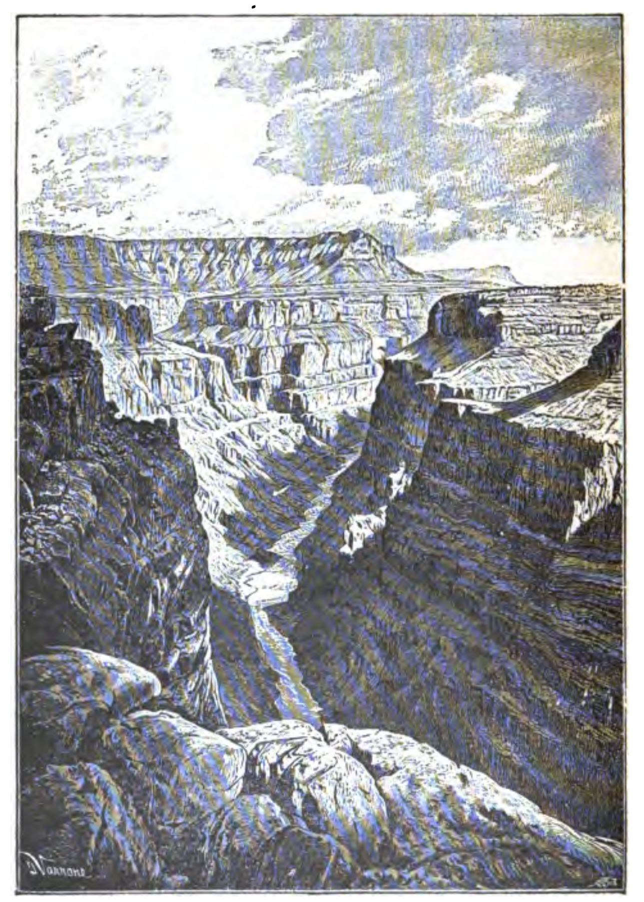


Fig. 6. — Le grand Canyon du Colorado.

De temps en temps, la rencontre de quelque roche plus dure arrête l'effort des eaux, qui se précipitent par-dessus

en *cataractes*, *cascades* ou *rapides*, en attendant que, à la faveur du creusement opéré par leurs tourbillons entraînant du sable, elles aient réussi à emporter définitivement l'obstacle. Souvent cet arrêt momentané détermine en amont la formation d'un lac où les affluents viennent verser des deltas torrentiels. Plus tard, quand le barrage est rompu, les lacs se vident, laissant à découvert, sous forme de *terrasses*, les graviers ainsi déposés.

Quand, au lieu d'un obstacle qui arrête son action, l'eau courante rencontre des fentes dans le terrain qu'elle traverse, elle s'y introduit immédiatement, descendant jusqu'au point le plus bas qu'elle puisse atteindre sans cesser de trouver un écoulement. Ainsi se creusent les *gorges* aux parois escarpées, dont le type est offert par les célèbres *canyons* du Colorado (fig. 6), sortes de gouffres dont les murailles sont quelquefois verticales sur un millier de mètres de hauteur.

Ces gorges abondent surtout dans les pays perméables, parce que les terrains qui les composent, calcaires ou grès, sont parcourus par des fissures nombreuses. Mais une gorge profonde peut traverser une suite de couches alternativement perméables et imperméables, si une lente ascension en masse du terrain vient accroître ou du moins entretenir constamment la force vive de l'eau courante.

Alluvionnement. — Le propre d'une rivière divagante est d'attaquer les parties concaves de ses rives, contre lesquelles l'eau des crues vient se briser, et de les faire ébouler par portions. Mais sur les rives convexes et dans les remous, au contraire, la vitesse s'amortit et les produits de l'éboulement se déposent en formant des *alluvions*. Sans cesse remaniés lors des changements de lit, les matériaux de ces alluvions, qui sont des cailloux, des graviers, des sables et des limons, cheminent de proche en proche vers l'aval, et les plus gros, arrondissant constamment leurs angles par frottement mutuel, deviennent des *cailloux roulés*.

C'est lors des crues que se déposent les alluvions des cours d'eau. Les cailloux et graviers tombent les premiers, au sein d'une eau qui conserve encore une vitesse sensible, et tendent ainsi à former, à peu de distance du lit habituel, des bour-

relets où les matériaux sont souvent en couches inclinées. La grosseur des éléments y varie beaucoup, suivant la force des débordements successifs. Les sables vont plus loin, et se déposent dans les eaux plus tranquilles, ce qui permet quelquefois la conservation des fragiles coquilles des mollusques d'eau douce. Quant au limon, c'est un produit impalpable, tombé dans une eau sans vitesse, au moment où les eaux débordées vont rentrer dans leur lit. Souvent on y peut distinguer trois couches : l'une, inférieure, un peu mélangée de menu sable; l'autre, moyenne, qui est le vrai limon, formé de très petits grains siliceux et de silicate d'alumine ferrugineux; la troisième, charbonneuse, résultat du dépôt et de la décomposition sous l'eau des matières végétales, que la rivière charrie encore lorsqu'elle ne peut plus transporter de fragments minéraux.

Conditions du transport des cailloux et graviers. — Pour qu'un cours d'eau transporte des pierres de la grosseur d'un œuf, il faut que sa vitesse au fond soit au moins égale à 1 m. 20 par seconde. La Seine, même en temps de crue, n'atteint jamais ce chiffre et ne peut par conséquent déplacer que du petit gravier.

Cette observation est très importante; car le fond de la Seine (aussi bien d'ailleurs que celui de tous les cours d'eau principaux aujourd'hui à l'état de régime) est tapissé par une nappe, épaisse de plusieurs mètres, de gros cailloux roulés. Non seulement la rivière est maintenant impuissante à déplacer les matériaux de cette nappe; mais, quelque augmentation qu'on imagine pour le débit de ses crues, il est impossible que la vitesse sur le fond en reçoive assez d'accroissement pour mettre les gros cailloux en mouvement. Une augmentation momentanée de la pente pourrait seule produire ce résultat. Par suite, on peut affirmer que de telles rivières ont traversé, avant l'état actuel, une période où les relations mutuelles de niveau, entre la terre ferme et l'océan, n'étaient pas ce qu'elles sont de nos jours.

Variabilité de l'action des cours d'eau. — Ainsi tout cours d'eau a son histoire, plus ou moins compliquée suivant l'étendue et la composition de son bassin. Non seulement

cette histoire a des phases bien distinctes, mais, dans chacune d'elles, l'activité dynamique du cours d'eau est intermittente, comme celle du vent ou des vagues de la mer. Ce n'est que dans les périodes de crues qu'une rivière, même divagante, dépose ou remanie sensiblement ses alluvions. Or le retour des crues est très capricieux; des années entières peuvent s'écouler sans qu'il s'en produise et, par conséquent, sans que la rivière accomplisse un travail géologique appréciable; tandis qu'une inondation de quelques heures, survenant avec violence, pourra modifier le lit majeur dans toute son étendue.

En tout cas, si les circonstances extérieures demeurent les mêmes, la marche que poursuit un cours d'eau le conduit sûrement vers une situation d'équilibre et, quand il l'a conquise, sa puissance, comme agent de remaniement et de transport, est réduite au point de se trouver parfois presque entièrement supprimée. Aujourd'hui les diverses rivières se montrent très inégalement avancées dans ce travail de conquête. Les unes, comme le Nil, ont acquis une stabilité presque absolue; d'autres, comme la Loire, remanient encore leur lit. Mais, pour toutes, les dimensions actuelles des vallées sont très supérieures à ce qu'exigent les plus fortes crues. Cela témoigne évidemment d'un état antérieur, où le régime des eaux devait être beaucoup plus violent, par suite d'une plus grande abondance des pluies et peut-être d'une plus forte valeur de la pente.

Profil des vallées. Modelé du terrain. — Dans tous les pays où l'imperméabilité du sol fait prévaloir le ruissellement, le profil en travers des vallées est concave (fig. 7) et se rapproche d'autant plus d'un V que le régime est plus torrentiel. Cette forme concave tient à ce que les versants imperméables laissent se former à leur pied, par entraînement de débris lors des grandes pluies, des talus de *dépôts meubles sur les pentes*, qui viennent se souder avec le limon déposé par le cours d'eau dans ses crues. Au contraire quand, par suite de la perméabilité du sol, cet apport latéral fait défaut, le fond du lit majeur est plat; parfois même (fig. 8) la rivière coule sur la partie la plus haute de ce fond, le lit mineur ne pou-

vant guère manquer de s'exhausser graduellement par les matières que la rivière charrie, si tranquille et si limpide qu'elle soit, et qu'elle dépose en bourrelets uniquement sur les bords du courant.

En tout cas, quel que soit le profil des versants, ceux-ci doivent s'aplatir à la longue, la pluie leur enlevant sans cesse

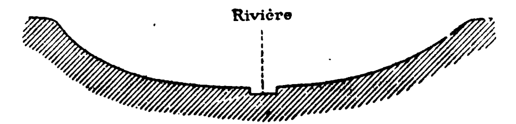


Fig. 7. — Profil d'une vallée à versants imperméables.

des particules qui viennent s'accumuler à leur pied. Le travail d'une rivière et de ses affluents a donc pour effet de faire descendre en masse tout le bassin du cours d'eau, en lui imprimant un *modelé* dont les éléments doivent s'adoucir de plus en plus à mesure que se poursuit le *cycle* d'érosion. Mais



Fig. 8. — Profils de vallées à versants perméables.

celui-ci peut être interrompu par un mouvement du sol ou par un changement du niveau de base, qui déterminerait l'ouverture d'un nouveau cycle.

Dépôts d'embouchures. Barres. Deltas. — A quelque période de son évolution qu'un fleuve soit parvenu, ses eaux, à la fin de leur course, vont déboucher dans le grand réservoir de l'océan, où elles arrivent en général avec assez peu de vitesse pour ne pouvoir entraîner que du sable fin et de la vase. Si l'embouchure est un *estuaire* profond et que des courants sensibles balayent la côte, les détritus sont dispersés à leur arrivée dans la mer, sans que leur chute (assez rapide en raison des propriétés particulières de l'eau salée) se traduise autrement que par une *barre*. C'est une

digue mobile de vase qui se forme, au-devant de l'embouchure, à quelque distance au-dessous de la surface, et dont la crête s'élève ou s'abaisse suivant les circonstances, en même temps qu'elle se déplace en avant ou en arrière.

Il n'en est plus ainsi quand l'embouchure est large, peu profonde, et que la mer où se verse le fleuve est dépourvue de marées sensibles ainsi que de courants littoraux rapides. Dans ce cas, si le cours d'eau est suffisamment chargé de matières en suspension, celles-ci se déposent dans l'estuaire et en opèrent peu à peu le comblement, sous la protection du cordon littoral de vase et de sable, que la vague ne manque pas d'élever en travers de l'embouchure; après quoi le fleuve franchit ce cordon et pousse ses alluvions jusque dans la mer, formant, au-devant de son ancien débouché, des atterrissements qui augmentent de proche en proche le domaine continental. Ces atterrissements se produisent, surtout lors des crues, sur les rives mêmes de la branche principale du fleuve; mais celle-ci est instable et se déplace fréquemment; de telle sorte que le dépôt finit par couvrir une assez vaste surface triangulaire, qui tourne sa pointe vers le fleuve, tandis que sa base est courbe et convexe du côté de la mer. De là le nom de *Delta*. Chaque fleuve traverse son delta par plusieurs branches d'inégale importance, susceptibles de se déplacer, parfois de s'oblitérer à la longue, et d'où se détachent de nombreux canaux secondaires.

Exemples de deltas. — Les deltas les plus célèbres sont : celui du Nil, aujourd'hui presque entièrement fixé et ne faisant plus aucun progrès appréciable; le delta du Rhône, qui progresse de nos jours à raison de 57 mètres par an devant la branche principale et qui a conquis, depuis l'époque gallo-romaine, près de 300 kilomètres carrés; le delta du Pô, où, par suite d'un apport annuel de troubles évalué entre 40 et 100 millions de mètres cubes (mais dont une grande partie est dispersée dans la mer Adriatique), le progrès des alluvions est de 70 mètres par an; le delta du Danube, correspondant à un apport de 60 millions de mètres cubes; enfin et surtout celui du Mississipi, où l'excès des troubles charriés sur ceux que l'érosion et la mer dispersent suffit pour former, chaque

année, une somme d'atterrissements de 28 millions de mètres cubes.

La force de ce fleuve est telle qu'il pousse son delta bien avant dans le golfe du Mexique, sous la forme d'une patte d'oie (fig. 9), dont le progrès annuel est de 80 ou 100 mètres.

Le Hoang-ho ou Fleuve Jaune, en Chine, le plus limoneux de tous les cours d'eau, a formé un delta qui s'étend au moins sur 250 000 kilomètres carrés. La Hollande tout entière n'est que la réunion des deltas de l'Escaut, de la Meuse et du Rhin, conquis sur la mer du Nord à la faveur des cordons littoraux de vase et de sable.

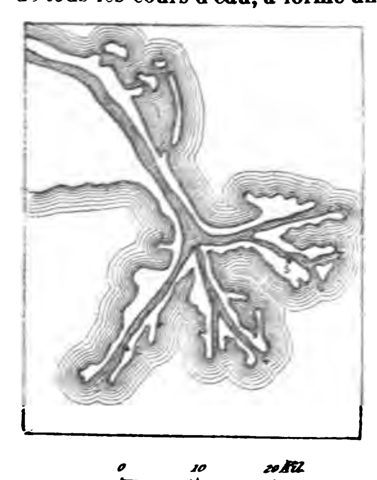


Fig. 9. — Delta du Mississippi. — 1, fourche des passes; 2, Pilotsville; 3, passe du sud-ouest: 4, passe du sud; 5, Balise; 6, passe du sud-est; 7, passe du nord-est; 8, passe à loutre.

Quant au delta du Gange, il se forme, malgré l'obstacle opposé par les marées du golfe de Bengale, grâce à la supériorité du courant du fleuve en période de crues, courant capable de refouler la mer, et aussi grâce à la grande masse des troubles charriés; mais ce delta est très instable et fréquemment remanié par les tempêtes. Le sol y manque d'assiette et plus d'un reptile nageur s'y engloutit en croyant aborder sur un terrain solide.

Caractères généraux des deltas. Fleuves sans embouchure. — Les atterrissements d'un delta se formant dans un milieu où les eaux salées ont accès, on y trouve, en fait de faune, un mélange de formes d'eau douce et d'autres spécialement caractéristiques des estuaires. En outre, comme il y a souvent lutte entre le courant du fleuve et la vague, la stratification des dépôts peut être tourmentée, parfois *entre-croisée.*

Il convient de répéter, au sujet des deltas, ce que nous avons déjà dit à propos du régime des rivières. Le phénomène ne saurait être permanent et la vitesse d'accroissement des atterrissements doit aller sans cesse en diminuant, à mesure que le fleuve se rapproche de la stabilité définitive. Si quelques deltas progressent, de nos jours, plus vite qu'aux siècles précédents, c'est parce que les défrichements opérés par l'homme ont, en dénudant le sol, augmenté momentanément la puissance du ruissellement et, par suite, la quantité de matières solides charriées à la mer. Mais toutes les fois que des sondages ont été pratiqués dans les deltas des grands fleuves, on a pu reconnaître par la série des dépôts que leur formation avait été, au début, plus active et plus violente qu'aujourd'hui.

D'une manière générale et à moins d'un changement de conditions extérieures, un moment doit venir pour chaque fleuve où non seulement la formation du delta s'arrête, mais encore le courant peut n'avoir plus la force d'entraîner les troubles jusqu'au bout. Alors l'embouchure doit s'obstruer et se transformer en marécages, comme c'est le cas pour ces fleuves de l'Asie centrale, où l'activité humaine n'a pas suffisamment veillé à assurer le libre écoulement des eaux par une lutte incessante contre l'alluvionnement.

Bassins perméables. Nappes d'eau. — Le ruissellement ne se produit pas, lorsque la pente du sol est faible, dans les pays où le terrain est perméable. Il y a deux sortes de formations perméables : les terrains *meubles*, c'est-à-dire les sables et graviers, où toute la masse peut être imbibée d'eau, à cause des innombrables interstices que laissent entre eux les éléments; et les terrains *fissurés*, tels que les calcaires solides et les grès, où l'eau pénètre par des fentes et va se rassembler dans un réseau de canaux souterrains.

Dans les terrains meubles, l'infiltration fait naître, par imbibition progressive, des *nappes d'eau* continues, dont le niveau s'approche d'autant plus de la surface du sol, que la pluie a été plus abondante et l'évaporation moins active. Ces nappes trouvent leur écoulement par des *sources* dans le fond des vallées qui les entament, et sur les deux versants desquelles elles se relèvent progressivement, étant mieux protégées sous les

lignes de faîte contre l'action du soleil, grâce à l'épaisseur plus grande du terrain qui les recouvre.

Quand une couche meuble repose sur un lit d'argile, l'eau qui s'y est infiltrée, arrêtée par l'imperméabilité de ce dernier, va chercher son écoulement sur les flancs des vallées, aux points où affleure la couche argileuse, en déterminant un *niveau d'eau*, toujours indiqué par la végétation, habituellement par des peupliers. Si l'affleurement subit des ondulations, de petites *sources* en marquent les points les plus bas.

Nappes jaillissantes. — Lorsque la couche absorbante plonge, dans les profondeurs du sol, *au-dessous* d'une couche imperméable, cette dernière retient les eaux sous pression et

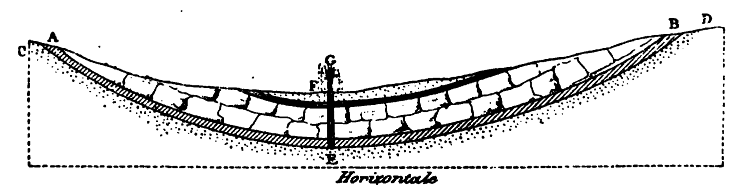


Fig. 10. — Nappe jaillissante. — AB, couche imperméable ; CD, couche aquifère ; EF, puits artésien.

les oblige à descendre en formant une *nappe souterraine* sans écoulement. Il suffit que, par un sondage ou un puits, on perce la couverture argileuse, pour que les eaux, obéissant à la pression hydrostatique, s'élèvent dans le puits et quelquefois *jaillissent* à la surface du sol (fig. 10). Dans ce cas, le sondage est dit *artésien.*

Les puits artésiens de Paris (Grenelle, Passy, etc.) recueillent, entre 500 et 600 mètres de profondeur, les eaux tombées dans les Ardennes, la Champagne et la Bourgogne sur l'affleurement d'une couche de *sables verts*. Malgré la perte de charge que l'eau subit dans son long parcours souterrain, elle garde encore assez de force ascensionnelle pour s'élever à 40 mètres au-dessus de la plaine d'alluvions de la Seine.

Terrains fissurés. Grottes. — Lorsqu'un bassin hydrographique est formé surtout de terrains fissurés, les eaux d'infiltration circulent à travers les fentes, les élargissent peu à peu,

y créent des cavités ou *grottes*, où elles s'accumulent et vont parfois, après un très long parcours, déboucher dans quelque vallée en donnant naissance à des *sources* abondantes (*dhuys* de la Bourgogne), remarquables à la fois par leur limpidité et leur constance. Telles sont, par exemple, les sources de la haute vallée de la Seine.

Le débit de ces sources étant régularisé par le long parcours des eaux qui les alimentent et surtout par les réservoirs souterrains qu'elles ont traversés, les rivières issues de ces sources sont généralement exemptes de crues violentes et ne charrient qu'exceptionnellement du limon et des sables. Aussi leur régime est-il très stable et leur action mécanique à peu près négligeable. En revanche, la longue circulation des eaux souterraines à travers les canaux sinueux des grès et surtout des calcaires dérange souvent l'assiette du terrain et provoque des *effondrements* de la surface, lorsque les cavités, produites par l'élargissement progressif des fentes, sont devenues trop larges pour pouvoir continuer à se soutenir.

C'est surtout dans les terrains de cette nature que s'observent les canyons ou gorges profondes, l'eau ayant profité des fissures qui s'offraient à elle pour atteindre le plus rapidement possible son niveau de base.

Éboulements. — C'est aussi à la lente infiltration des eaux que sont dus certains éboulements qui, dans les pays de montagnes, prennent les proportions de véritables catastrophes. Ces phénomènes se produisent quand des pluies excessives ou la fonte des neiges ont délayé certaines couches de terrain. Les assises que ces couches supportent, après s'être progressivement fissurées, finissent par glisser en masse et s'abattent en quelques minutes dans la vallée voisine.

Parmi les éboulements les plus fameux, on peut citer celui du Rossberg, survenu en Suisse en 1806 et dont l'importance a été évaluée à 15 millions de mètres cubes; celui de Salazie (île Bourbon), qui, en 1875, a couvert 120 hectares d'un manteau d'éboulis de 40 à 60 mètres de hauteur; enfin celui de 1881 à Elm, en Suisse, représentant 10 millions de mètres cubes.

En même temps que ces éboulements produisent des dépôts

confus, qui rentrent avec les matériaux entraînés par les avalanches dans la catégorie des *dépôts meubles sur les pentes*, il leur arrive parfois de barrer les rivières et d'en changer le cours. Ce changement peut n'être que momentané, si la rivière parvient à emporter l'obstacle après avoir formé en arrière un lac provisoire. Dans ce cas, la débâcle qui résulte de la rupture du barrage exerce des effets destructeurs encore plus puissants que ceux des torrents ordinaires.

Mesure de l'activité des eaux courantes. — Par suite du travail des eaux courantes, les vallées s'approfondissent, leurs versants s'aplatissent; ainsi, d'un mouvement lent mais continu, la terre ferme perd de son volume, et son relief s'atténue peu à peu. Il est possible de se rendre compte, jusqu'à un certain point, de la vitesse avec laquelle s'accomplit ce travail de dégradation.

Les principaux fleuves du globe emportent à la mer une proportion de matières solides qui paraît atteindre, en moyenne, 38 cent-millièmes du volume de l'eau débitée. D'autre part, le volume total annuel de l'eau des fleuves à leur embouchure peut être évalué à environ 27 000 ou 28 000 kilomètres cubes. D'après cela, on calcule que les sédiments amenés dans l'océan par les eaux courantes représentent, chaque année, un peu plus de *dix kilomètres cubes* (c'est-à-dire dix milliards de mètres cubes). D'ailleurs les mêmes eaux courantes enlèvent annuellement aux continents, par simple dissolution, près de *cinq kilomètres cubes*. En tenant compte de l'ascension que le niveau marin subirait par le seul fait de l'arrivée des sédiments dans la mer, on peut déduire de ces données que, *si l'activité des agents extérieurs demeurait toujours ce qu'elle est aujourd'hui, cinq millions d'années leur suffiraient* pour amener la disparition totale de la terre ferme, dont l'altitude moyenne diminuerait ainsi de 14 centièmes de millimètre par an. Encore ne tient-on pas compte dans cette évaluation du travail d'érosion qui s'accomplit dans les bassins privés d'écoulement vers la mer, lesquels représentent plus d'un cinquième de la superficie continentale, non plus que de l'action des eaux marines, qui va maintenant nous occuper.

§ 4

ACTION DE LA MER

Érosion du rivage. Sédiments. — Nous venons de voir quelle masse considérable de matières solides était apportée, chaque année, dans l'océan. Une partie de cette masse se dépose dans les estuaires et les deltas; mais le reste en franchit les limites et vient se mélanger à tous les débris que les vagues de la mer ont arrachés aux rivages.

Au premier abord, à ne considérer que le bruit habituel des flots, on serait tenté de croire que l'érosion marine doit être supérieure en importance à l'activité beaucoup plus silencieuse des cours d'eau. Il n'en est rien, comme on peut aisément s'en assurer. Mais auparavant définissons le mode d'action de la mer sur ses rivages.

Poussées par le jeu périodique de la marée et plus encore par les vents dominants, qui viennent du large, les vagues vont assaillir la côte, où déjà l'infiltration des eaux pluviales et les alternatives de la température ont préparé la désagrégation des roches. Ces dernières s'écroulent par morceaux, que le choc des lames continue à débiter, et ainsi la côte recule peu à peu, sous l'effort de l'*érosion*. Tandis que les matériaux plus durs demeurent sur le rivage, constamment ballottés dans un espace restreint, où ils se contentent d'arrondir leurs angles par frottement mutuel, en devenant des *galets*, disposés en terrasses, d'autres, également durs, mais moins cohérents, se réduisent en fragments plus menus qui, emportés par le flot de retour, viennent former, en avant des galets, une plage de *graviers* d'abord, de *sables fins* ensuite.

Quant aux matières assez fines pour demeurer en suspension dans les eaux agitées, comme les boues qui proviennent de la trituration des argiles, elles vont se déposer plus loin du rivage, aux endroits où la vitesse des lames est moindre et où, par une sorte de filtrage, ces boues peuvent arriver peu à peu dans les couches d'eau inférieures, soustraites aux agitations de la surface. Ainsi prennent naissance des dépôts

de *boues* ou *vases*, plus ou moins mêlés de menus débris de nature sableuse.

On sait aujourd'hui, par les sondages en eau profonde, que ces vases forment, en avant des côtes, une ceinture, dont la largeur se tient entre 250 et 300 kilomètres, de boues tantôt vertes, tantôt bleuâtres. Bien loin de s'étendre sur le lit entier des océans, ces dépôts, qu'on a appelés *terrigènes*, parce qu'ils proviennent de la dégradation de la terre ferme, sont localisés sur cette bande relativement étroite, dont on évalue l'importance à environ 70 millions de kilomètres carrés, soit seulement *un cinquième* de la superficie océanique. Le reste ne reçoit aucun apport mécanique.

Activité de l'érosion marine. — Les vases détritiques ne renferment pas seulement les matières fines produites par l'attaque des vagues contre le rivage. Elles contiennent, en proportion dominante, les troubles apportés par les fleuves et non déposés dans les deltas. Nous disons en proportion *dominante*. En effet, l'observation prouve qu'il serait excessif d'admettre que l'érosion marine fît reculer l'ensemble de toutes les côtes, en moyenne, de plus de *trois mètres par siècle*. A ce taux, en supposant que les rivages aient une hauteur moyenne de 40 mètres, l'étendue totale des côtes étant voisine de 260 000 kilomètres, il en résulterait une perte annuelle d'environ *trois dixièmes de kilomètre cube*, c'est-à-dire hors de proportion avec le chiffre qui représente l'ablation par les eaux courantes.

On peut encore prendre le calcul d'une autre façon; car une ablation séculaire de 3 mètres fait perdre à la superficie continentale 780 kilomètres carrés par siècle, ce qui exigerait, pour la disparition totale, un chiffre de plus de 18 millions et demi d'années, soit près de quatre fois plus de temps que ce que réclamerait la seule érosion par les eaux courantes.

La supériorité de l'œuvre accomplie par celles-ci est d'ailleurs mise en évidence par ce fait, que la bande formée le long des côtes, par les dépôts détritiques, subit un élargissement notable partout où débouche un grand fleuve. Cet effet est particulièrement marqué au-devant de l'embouchure du Gange, comme de celle du fleuve des Amazones.

Stratification des dépôts détritiques. — Tous les dépôts ainsi formés sont des *sédiments*, c'est-à-dire constitués par la chute de matières solides au sein de l'eau. De plus ils sont *détritiques*, c'est-à-dire qu'ils consistent en *débris* empruntés à des *roches* préexistantes. Comme la pesanteur est l'agent de leur chute, ils doivent se disposer conformément aux lois de la gravité; ce qui exige que les débris tombent à plat et s'accumulent de telle sorte, que la surface du sédiment soit toujours horizontale, sauf dans la zone des graviers, où la vitesse de l'eau permet la disposition en couches inclinées. De plus, l'activité de la destruction des côtes étant inégale, puisque la puissance de la vague dépend de l'heure de la marée et qu'en outre une seule tempête peut faire incomparablement plus de travail que toute une série de jours calmes; d'autre part, l'apport des troubles par les fleuves étant essentiellement variable suivant les saisons et le régime des eaux, le dépôt n'est pas continu. Les éléments n'y sont pas à tout instant de la même grosseur ni de la même nature. C'est pourquoi le sédiment doit tendre à se diviser, suivant les surfaces qui correspondent aux plus grandes variations du phénomène, en *couches* ou *strates* distinctes, ce qui légitime l'appellation de *dépôts stratifiés*, appliquée aux formations *sédimentaires*. Remarquons seulement que, s'il s'agit de boues extrêmement fines, déposées à la façon d'un précipité nuageux dans une liqueur tranquille, la stratification pourra demeurer indistincte, à moins qu'elle ne soit accusée de temps en temps par un brusque arrêt de la sédimentation.

Débris organiques. — Les animaux qui vivent dans la mer doivent nécessairement, après leur mort, laisser leurs dépouilles sur le fond. Parmi les coquilles, les unes sont ramenées à la surface et flottent jusqu'à ce qu'elles aient été rejetées, entières ou en fragments, au milieu des graviers littoraux; les autres, celles dont les animaux vivaient enfouis dans la vase, ne laissant passer que l'extrémité de leur tube, demeurent dans le sédiment, avec la position qu'elles occupaient à l'état vivant. Quant aux vertébrés, après que leurs corps ont flotté quelque temps, les dents et les ossements se dispersent plus ou moins et, sous l'action combinée des cou-

rants et de la pesanteur, vont se disséminer, partie dans les graviers littoraux, où ils sont rapidement enfouis, partie dans les boues profondes. De toutes manières, les dépôts marins littoraux, qui ne correspondent pas à des eaux trop violemment agitées, renferment les débris des animaux contemporains de leur formation.

Il n'en est plus ainsi pour les parties du fond des mers, très éloignées des rivages, où ne parvient aucun dépôt détritique. La drague rapporte de ces profondeurs, parfois en surprenante abondance, des dents de requins et des caisses tympaniques de baleines, à surface tantôt fraîche, tantôt recouverte de plusieurs centimètres d'un enduit à couches concentriques d'oxyde de fer et de manganèse. Non seulement l'épaisseur de cet enduit, d'origine chimique, atteste que les ossements ont séjourné sur le fond pendant un temps considérable; mais il en est, parmi ces débris, qui n'appartiennent certainement pas à l'époque actuelle, et qui, d'après leur espèce, doivent être là depuis les temps tertiaires, rien n'étant venu les recouvrir après leur chute.

Variété des dépôts synchroniques. — Les sédiments doivent se ressentir, dans leur composition, de la nature des roches qui leur ont donné naissance. En outre, leur puissance, pour un intervalle de temps déterminé, dépend de l'activité de l'érosion, laquelle est essentiellement variable suivant les points. Une même époque verra donc le fond de la mer, au voisinage des côtes, se tapisser de dépôts très différents quant à la nature et à l'épaisseur, et aussi quant à la faune, cette dernière pouvant être *littorale* ou *pélagique* (c'est-à-dire de haute mer). Dans le premier cas, la faune pourra correspondre à des profondeurs d'eau très différentes, ce qu'on devra reconnaître à l'espèce des coquilles enfouies. Dans le second, les espèces varieront aussi, selon qu'il s'agira de fonds rocheux ou de fonds vaseux, de mers chaudes ou de mers froides, etc. En un mot, la diversité des dépôts traduira la variété des conditions physiques.

Parages dépourvus de dépôts. — Nous avons dit que les vases détritiques s'étendaient rarement à plus de 300 kilomètres en avant des côtes. Par suite, dans les océans qui offrent

des espaces libres d'une grande largeur, ces espaces ne peuvent recevoir sur le fond aucun dépôt mécanique, à moins que des courants ayant pris naissance près des rivages n'y entraînent, soit directement, soit à l'aide des glaces flottantes, quelques fragments de roches, ou que de menues esquilles de pierre ponce n'y parviennent après avoir flotté à l'aventure, comme c'est le cas dans le Pacifique. Dans ces régions, il ne peut se former que des dépôts chimiques ou organiques; mais ce sujet appartient à un autre chapitre de la dynamique externe et il en sera question plus loin.

Il y a, dans le voisinage des côtes, des parages où les dépôts mécaniques font défaut, parce que les courants sont assez puissants pour balayer le fond de la mer. Seulement cela n'arrive en général que dans des détroits de faible profondeur, la vitesse des courants diminuant assez vite au-dessous de la surface.

Intensité variable de l'érosion marine. — Telles sont les conditions normales de l'action dynamique de la mer. Mais une question se pose, celle de savoir si cette action peut s'exercer indéfiniment avec la même intensité moyenne. Les faits ne permettent pas de le croire. A moins qu'il n'intervienne un changement dans les relations de niveau de la terre ferme et de l'océan, une côte, à force de se dégrader, doit finir par acquérir un profil qui la rende de moins en moins accessible à l'attaque des vagues. Déjà nous avons indiqué le rôle protecteur que jouent les cordons littoraux de dunes. Les galets et limons sont souvent tout aussi efficaces. Ils régularisent le contour des côtes, par suite de leur tendance à former des cordons rectilignes, laissant en arrière des anses ou des *lagunes* destinées à se combler peu à peu. La végétation, lorsqu'elle parvient à s'installer dans l'intervalle de deux grandes marées, produit, sur les vases littorales de récente formation, un excellent effet de consolidation. Même les côtes découpées en falaises finiraient par n'être plus entamées, si la gelée et les infiltrations ne venaient en aide aux vagues, en préparant la division des roches. Ainsi l'intensité de l'érosion marine, à supposer qu'elle ne reçoive pas de secours du dehors, doit aller en décroissant en chaque point, et ses pro-

grès mêmes imposent une limite à son efficacité. Sa valeur se montre d'ailleurs très variable, comme on en peut juger quand on compare la stabilité presque absolue des côtes de la Bretagne avec l'érosion des falaises de la Hève, progressant à raison de 25 ou 30 centimètres par an, et mieux encore avec l'attaque de certains points des côtes de l'Angleterre et de la mer du Nord, où l'*ablation* annuelle n'est pas inférieure à un mètre.

Cette diversité trouve sa raison d'être, non seulement dans l'inégalité de puissance des vagues ou de résistance des roches, mais encore dans ce fait que probablement le travail de la mer n'a pas commencé sur toutes les côtes à la même époque, de telle sorte qu'il peut être, suivant les localités, très inégalement avancé.

§ 5

ACTION DE LA GLACE

Chutes de neige. Neiges persistantes. — Il convient maintenant d'étudier ce que devient la partie de la vapeur atmosphérique qui s'est condensée sous la forme neigeuse.

Quand la neige tombe sur des régions de faible altitude, elle est tôt ou tard fondue par les rayons solaires et, suivant la nature du sous-sol, le produit de cette fusion vient accroître la part du ruissellement ou celle de l'infiltration. L'action dynamique de ce produit se confond avec celle des eaux courantes et il y a eu simplement, dans sa manifestation, un temps d'arrêt causé par le peu de mobilité des particules neigeuses. En outre, il est à remarquer que la neige, par la lenteur avec laquelle elle fond, facilite l'infiltration sur les pentes, en faisant pénétrer goutte à goutte, dans le sol, de l'eau qui aurait pu ruisseler à la surface, si sa chute avait eu lieu sous la forme liquide. Elle contribue donc encore de ce chef à la régularisation du régime des cours d'eau et à la diminution de leur puissance mécanique.

Bien plus important est le rôle de la neige qui tombe sur les hautes montagnes, dans ces régions où la raréfaction de

l'atmosphère est telle, que la chaleur de la saison chaude ne parvient pas à fondre la totalité des neiges tombées pendant la saison froide. Dans ces conditions, les neiges deviennent *persistantes* ou *perpétuelles* et peuvent s'amonceler en quantités considérables.

Cette permanence des neiges se manifeste à partir d'une certaine ligne dont l'altitude, variable avec les contrées et l'abondance des neiges, est de 2 800 mètres en Suisse, de 3 500 à 4 300 mètres au Caucase, tandis qu'elle s'abaisse au niveau de la mer, dans l'hémisphère méridional, dès le 62° degré de latitude. Plus le climat est exempt de variations, plus la limite des neiges persistantes est nette et stable. Sous les tropiques, elle forme, entre 4 700 et 5 000 mètres d'altitude, une ligne horizontale d'une netteté absolue. Au contraire, sa position varie beaucoup dans l'hémisphère nord, à cause de la grande différence entre l'hiver et l'été.

Avalanches, névé. — Quelle que soit l'abondance des chutes de neige, l'accumulation d'une matière aussi meuble a nécessairement une limite. Quand cette limite est dépassée, des paquets de neige tombent sur les pentes, formant les *avalanches*, si redoutées des montagnards, non seulement à cause de leur masse, mais à cause de la quantité de pierres et de blocs qu'elles peuvent entraîner dans leur chute.

Ou bien les avalanches glissent sur une pente qui ne permet pas leur concentration et, dans ce cas, la neige, après avoir accompli son œuvre et déposé sa charge de matériaux solides, alimente en fondant les torrents voisins; ou bien l'excès des neiges persistantes est dirigé, par la convergence des cimes, vers un réservoir en forme de grand cirque, où il s'emmagasine et devient, après avoir subi diverses transformations, la source d'un *glacier*. Ce réservoir est donc, pour le glacier qu'il alimente, un *bassin de réception* des neiges, équivalent du bassin de réception des torrents.

Au moment où la neige tombe sur les hautes montagnes, elle est à l'état de petits cristaux en forme d'étoiles. Bientôt ces cristaux subissent, sous l'action des rayons solaires, un commencement de fusion et deviennent des granules plus ou moins arrondis, dont l'ensemble forme une sorte de poussière

blanche très mobile. En s'accumulant dans les grands cirques, cette poussière de neige commence à s'agglomérer, l'eau qui provient de la fonte superficielle des grains se congelant dans leurs interstices. De là résulte un amas peu cohérent de granules, parsemé de bulles d'air, qu'on appelle le *névé*.

Formation des glaciers. — Les couches inférieures du névé sont de plus en plus compactes à cause de la pression qu'elles supportent, pression qui suffit pour les transformer en glace à toutes les hauteurs. D'ailleurs le cirque dans lequel les neiges se sont emmagasinées débouche toujours dans une gorge plus ou moins encaissée, où le névé, sollicité à la fois par son poids et par la pression d'amont, est forcé de descendre. De cette manière, le névé finit par arriver dans une zone de moindre altitude, où la température est au-dessus de zéro. La fusion partielle qui en résulte augmente la compacité de la masse, et ainsi, de la poussière neigeuse des cimes, on passe à cette glace cohérente, translucide, parsemée de fissures capillaires et parfois de veines bleuâtres, qui caractérise les *glaciers* proprement dits.

Un glacier peut donc être qualifié : un appareil naturel qui a pour fonction de débiter l'excès des neiges persistantes, tombées sur toute l'étendue d'un cirque montagneux.

En tout cas, de même qu'un fleuve est surtout alimenté par les pluies, de même un glacier a besoin, avant toute chose, d'abondantes chutes de neige, et comme celles-ci résultent de la condensation de la vapeur atmosphérique, des vents humides sont par-dessus tout nécessaires à la production des glaciers. Le froid tout seul n'en saurait faire naître, et c'est pour cette cause que les glaciers sont si rares dans le Tibet, où l'air arrive sec, s'étant dépouillé de son humidité sur le flanc de l'Himalaya, et en Sibérie, où l'air est aussi sec que froid.

Crevasses. Regel. — La glace étant inextensible et à peu près dépourvue de plasticité, elle se fissure sans cesse lorsque, dans son mouvement de descente, elle subit des compressions ou des dilatations. Mais les crevasses ainsi produites sont bientôt comblées par des chutes de neige ou de menus fragments de glace, autour desquels les eaux d'infiltration,

provenant de la fonte superficielle, viennent se geler de nouveau, en faisant du tout, sous l'effort de la compression d'amont, une masse solide. La continuité de la glace, constamment interrompue par la formation des crevasses, est donc aussi constamment rétablie par le *regel.* L'ensemble de la masse étant d'ailleurs maintenu dans un milieu où règne une température supérieure à zéro, il en résulte pour la glace une tendance à se rapprocher de la forme liquide, et la pression des parties supérieures s'y fait sentir en même temps que l'action de la pesanteur. De plus, les fissures capillaires divisent sa masse en grains qui peuvent se mouvoir les uns relativement aux autres. De cette manière, il est permis de dire qu'un glacier est un fleuve ou plutôt un torrent d'eau glacée, dont l'analogie avec les eaux courantes se prononce d'autant plus nettement que la température ambiante est plus élevée.

Mouvement des glaciers. — Des mesures précises ont en effet permis de constater que les glaciers cheminent avec une vitesse variable, plus sensible à la surface qu'au fond, et atteignant son maximum au milieu de la largeur, tandis que, sur les bords, elle est réduite par le frottement des parois. Avant ces mesures, on savait déjà qu'un glacier restituait en aval les objets tombés à sa surface en amont. Par exemple, l'échelle abandonnée en 1788 par les guides de Saussure, au pied de l'Aiguille Noire, avait été retrouvée en débris cinquante-sept ans plus tard, à 4 kilomètres et demi plus bas. En Suisse, la vitesse moyenne de la glace, à la surface, varie depuis 2 à 5 centimètres jusqu'à 1 m. 25 par vingt-quatre heures. La vitesse des grands fleuves étant habituellement comprise entre 0 m. 50 et 1 m. 50 *par seconde*, on en peut conclure immédiatement qu'un glacier est un appareil naturel, par lequel le mouvement du produit des précipitations atmosphériques se trouve retardé, au moins dans la proportion de *un à cent cinquante mille.*

Effets de transports. Moraines. — Mais si la vitesse d'écoulement est ainsi considérablement ralentie, la puissance de transport est, au contraire, accrue. En effet la glace, en descendant, entraîne nécessairement tout ce qui tombe à sa

surface. Un glacier est toujours encaissé entre deux parois abruptes, le long desquelles s'écroulent les blocs détachés des sommets par la gelée ou par les avalanches. Les produits de ces chutes forment, sur les deux bords du courant de glace, deux traînées latérales, connues sous le nom de *moraines* (fig. 11). On constate aisément que ces moraines se déplacent peu à peu, obéissant au mouvement de la glace qui les porte. Même, lorsque deux glaciers se réunissent en un seul, la moraine de droite de l'un se joint à la moraine de gauche de l'autre, et par là se forme une moraine médiane, qui peut garder longtemps son individualité, apparaissant comme une traînée noire vers le milieu de la largeur du glacier résultant. Et si cet effet se répète plusieurs fois, on distingue, à la surface de ce glacier, autant de traînées, d'inégale largeur, qu'il y a eu d'affluents inégalement puissants (fig. 11).

Pendant le transport, les blocs des moraines, fortement pressés contre les parois de la gorge, les usent, les polissent et souvent y tracent des stries ou rayures. Il en est de même sur le fond, lequel est en outre balayé par des courants sous-glaciaires, produits de la fonte partielle de la glace, qui charrient de la boue fine et de petites pierres. Tout cela finit par arriver en un point où l'*ablation*, c'est-à-dire l'intensité de la fonte de la glace, sous l'influence d'une température extérieure qui croît à mesure qu'on descend, devient justement égale à l'*alimentation*. Alors le glacier s'arrête, laissant s'échapper de son extrémité un torrent, dont l'eau est laiteuse à cause des fines particules qu'elle charrie.

Quand un glacier est puissamment alimenté, comme c'est le cas en Savoie pour la Mer de Glace du Mont-Blanc, son extrémité parvient sans peine jusqu'à la zone des cultures, et c'est un contraste remarquable que celui de cette nappe glacée avec les campagnes verdoyantes et les forêts qui arrivent presque à son contact. De même, en Nouvelle-Zélande, des chutes de neige d'une ampleur considérable parviennent à pousser le front de quelques glaciers jusqu'à une faible distance de la mer, au milieu de régions où se développe tout à l'entour une végétation luxuriante.

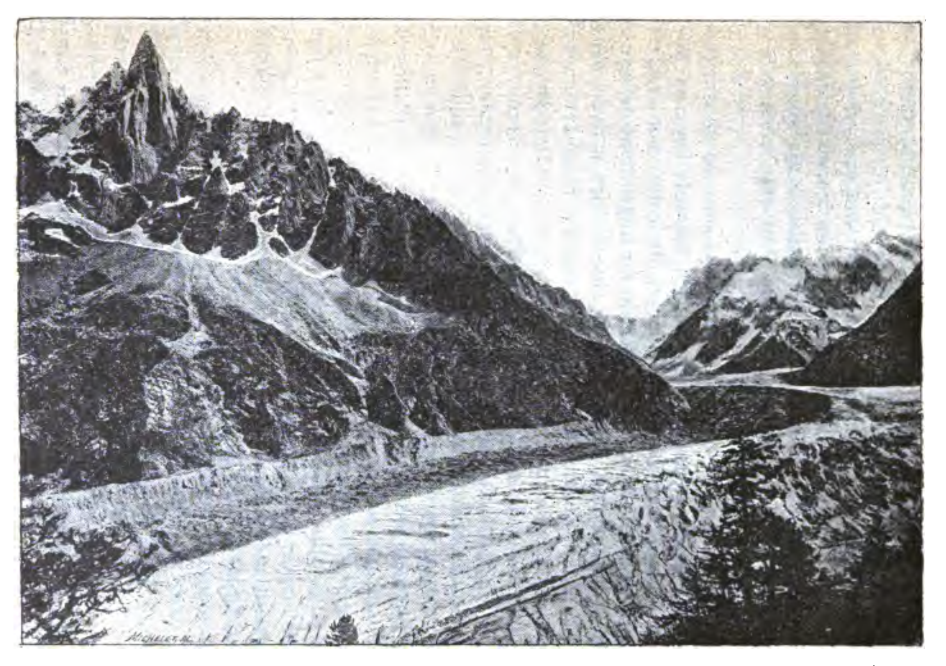


Fig. 11. — La Mer de Glace et ses moraines de droite, avec les glaciers suspendus de l'aiguille du Dru.

A l'extrémité libre d'un glacier, les moraines et les matériaux transportés sur le fond s'épanouissent en un amas demi-circulaire, qualifié de *moraine frontale*. C'est un mélange sans stratification de gros blocs, pour la plupart anguleux, de cailloux, de petites pierres et de boue d'un gris d'ardoise. Beaucoup des cailloux de cette moraine sont *polis*, *frottés* ou *rayés*. Cela est surtout fréquent avec les pierres calcaires, qui reçoivent beaucoup mieux les stries, mais aussi les perdent très vite par frottement dans l'eau ou par exposition à l'air.

Quelques-uns des blocs des moraines sont de dimensions énormes et dépassent tout ce que les torrents les plus violents seraient capables de déplacer. De cette manière, un glacier se révèle à nos yeux comme un instrument de transport d'une grande efficacité, qui aide à faire arriver, dans une situation de meilleur équilibre, soit des blocs arrachés à ces hautes cimes que l'eau courante ne saurait atteindre, soit des matériaux défiant, par leurs dimensions, la puissance des cours d'eau. En même temps, les glaciers régularisent, en les emmagasinant comme dans un réservoir, les produits des chutes de neige et assurent l'alimentation des fleuves en été, soit juste au moment où ils en ont le plus besoin. D'ailleurs la neige, par sa condensation, a restitué aux régions supérieures la chaleur latente que l'évaporation avait prise dans des pays plus chauds, tandis que, pour fondre, une fois transformée en glace, elle devra emprunter à des régions inférieures le calorique nécessaire. Les glaciers contribuent donc à *égaliser* les climats du globe.

Déplacements de l'extrémité des glaciers. — La position de l'extrémité libre d'un glacier résulte d'une sorte de lutte entre la quantité de glace qui arrive par l'amont, et la fusion superficielle due à l'action directe du soleil comme à celle de l'air ambiant. Cette extrémité ne pourrait demeurer fixe que si les éléments qui la déterminent étaient constants. Au contraire, rien n'est plus variable, suivant les années ou les périodes, que l'intensité des chutes de neige et l'activité des rayons solaires. Aussi voit-on se produire un déplacement continuel du front du glacier. Celui-ci tantôt recule, mettant à

découvert son fond poli et *moutonné*, tantôt s'avance, labourant impitoyablement sur son passage les cultures, les plantations et les maisons. L'histoire a enregistré de nombreuses oscillations de ce genre, et plus d'une ancienne moraine, aujourd'hui cultivée, mais reconnaissable à ses gros blocs et à la forme capricieuse de sa surface, se montre en des points que les glaciers ont cessé d'atteindre.

Si l'ablation et l'alimentation sont les deux principes antagonistes qui règlent la position du front des glaciers, leur action ne se fait pas sentir avec une égale rapidité. L'ablation s'exerce, par les rayons solaires sur toute la surface libre du glacier, par le soleil et le rayonnement de l'air ambiant sur la partie inférieure du fleuve de glace. Son action est donc immédiate, et l'influence d'un été chaud doit se traduire sans délai par une diminution de longueur et d'épaisseur. Quant à l'alimentation, c'est surtout par l'augmentation de la masse des névés qu'elle est efficace. Sans doute, une partie de la neige tombe directement sur le glacier et en accroît la masse; mais cet effet est peu de chose à côté de celui que doit produire l'excès des névés accumulés pendant tout un hiver neigeux, sur la surface entière du cirque où s'alimente le glacier. Or, avant de se révéler dans les régions inférieures, cet excès de névés doit se transformer et opérer une descente progressive qui, d'après le taux moyen de la vitesse des glaciers, demande au moins quelques années.

En Suisse, l'observation montre qu'une série d'hivers neigeux met quelquefois vingt-cinq ans à manifester son action. Et comme celle-ci, une fois commencée, continue à se produire, il arrive souvent que les mouvements de l'extrémité libre soient contradictoires avec l'ensemble des circonstances ambiantes, un glacier continuant à progresser pendant une suite d'années chaudes et sèches.

Influence de la jonction des glaciers. — Il est à remarquer aussi que les déplacements de l'extrémité des glaciers peuvent devenir, en quelque sorte, disproportionnés en apparence avec la cause qui les produit. En effet, si deux d'entre eux, jusqu'alors séparés, viennent à se réunir, ils formeront en général, une fois soudés dans une gorge commune, un cou-

rant dont la largeur ne sera pas égale à la somme des largeurs des affluents. Il faudra donc que l'épaisseur du glacier résultant soit plus considérable. Mais comme la fusion de la glace s'opère surtout par la surface et que cette dernière n'a pas augmenté en proportion de la masse, le glacier, mieux défendu contre l'ablation, s'avancera plus loin que ne l'aurait fait isolément chacun des deux affluents, cheminant sans se réunir. Ainsi, dans le cas où une exagération des chutes de neiges provoquerait la rencontre de plusieurs glaciers habituellement isolés, l'extrémité libre pourrait progresser beaucoup plus loin que ne le ferait supposer l'allure des affluents avant leur réunion.

Profil des gorges occupées par les glaciers. — Un glacier est un remarquable instrument de *déblaiement*. La glace, par le frottement des pierres transportées, fait disparaître sous un poli uniforme toutes les inégalités de la gorge qu'elle remplit, et sa pression suffit pour écarter de son lit tous les obstacles. Aussi quand, à la suite d'une longue série d'années sèches, le niveau de la glace s'abaisse en même temps que le front recule, on voit à découvert l'ancien lit sous la forme d'une gorge au fond assez plat, aux parois escarpées, ayant une section qui rappelle la lettre U, tandis que la section des vallées torrentielles, où les versants sont plus sujets à s'ébouler, a plutôt la forme d'un V.

En même temps que la glace excelle à déblayer son chemin en écartant tous les matériaux meubles, elle peut aussi approfondir son lit dans les roches dures, du moins dans une certaine mesure, en pénétrant dans les joints à la façon d'un coin.

Toutes les gorges aujourd'hui occupées par des glaciers laissent apercevoir des parois polies et arrondies jusqu'à une hauteur bien supérieure à celle que la glace a jamais atteinte depuis les temps historiques (voir la figure 11). Ce fait, joint à l'existence d'anciennes moraines, semées en divers points, permet d'affirmer que le travail et les dimensions des glaciers actuels ne sont plus qu'un écho affaibli de ce qu'ils ont été autrefois. Là encore, comme pour les torrents et les rivières, nous sommes ramenés par le seul examen des faits à la notion d'une période antérieure de plus grande activité.

Glaces polaires. — Le phénomène des glaces qui, dans les régions tempérées, est localisé au cœur des massifs montagneux, prend dans les hautes latitudes une extension considérable. La limite des neiges persistantes s'y abaisse progressivement jusqu'à atteindre le niveau de la mer et le sol disparaît, comme au Groenland, sous un manteau uniforme de neige et de glace, qui laisse à peine émerger quelques cimes.

La *calotte glaciaire* des régions arctiques ne transporte que très peu de pierres, ce qui n'a rien de surprenant, puisqu'elle est rarement dominée par des escarpements. Elle chemine cependant, avec une vitesse qui paraît même supérieure à celle des glaciers suisses, striant et polissant les roches sur son passage, et de véritables fleuves circulent sous sa masse. Le trop-plein de la calotte du Groenland s'écoule à la mer par de vrais glaciers, dont le front a quelquefois une immense largeur, mais dont beaucoup débouchent simplement au fond de profondes échancrures de la côte, appelées *fjords*. Après avoir flotté quelque temps, l'extrémité des glaciers polaires se brise en morceaux, qui deviennent des *glaces flottantes* ou *ice bergs*. Ces glaces flottantes de glaciers ne doivent pas être confondues avec les *banquises* qui se forment, le long des côtes, par congélation directe de l'eau de mer; ces dernières ont rarement plus de 5 ou 6 mètres d'épaisseur dans les mers arctiques, le froid de l'atmosphère ne se faisant plus sentir sous une couche de glace de cette puissance. En revanche, elles sont chargées de pierres et de boue, provenant des éboulements de la côte, et, quand elles se détachent en été pour flotter au gré des courants, les pierres se disséminent sur le fond de la mer.

Dans les parages antarctiques, la banquise, alimentée par des glaciers qui présentent un front immense, acquiert une énorme épaisseur. En beaucoup de points la glace flottante dépasse le niveau de sa ligne de flottaison de près de 40 mètres, ce qui exige entre 200 et 300 mètres d'épaisseur totale.

Si les glaces polaires n'ont pas de moraines à leur surface, du moins elles entraînent une *moraine profonde*, formée par les matériaux arrachés au terrain sous-jacent; c'est une boue

grise, parsemée de cailloux, les uns arrondis, les autres anguleux, la plupart frottés et rayés.

Quelque intense que soit aujourd'hui le froid des contrées voisines du pôle, il ne paraît pas suffisant pour expliquer toutes les accumulations de glace qu'on y observe. Aussi plusieurs d'entre elles sont-elles considérées comme des restes d'une époque antérieure, où les causes de froid étaient encore plus actives.

Glaces des rivières. — Un phénomène, qui a quelque analogie avec celui des banquises flottantes, se produit en hiver dans certaines rivières rapides et peu profondes. Des plaques de glace se forment sur le fond, pendant les nuits claires, à cause du rayonnement des cailloux qu'elles enferment à leur base. Ensuite elles viennent flotter à la surface et sont emportées par le courant, servant ainsi d'instruments pour déplacer des matériaux sur lesquels la rivière n'aurait pas de prise.

Le même effet de transport se répète sur les grands cours d'eau, dans certains hivers exceptionnels, lors de la rupture des *embâcles* que l'accumulation des glaces a fait naître en travers des étranglements du fleuve.

§ 6

ACTIONS CHIMIQUES

Caractère général des actions chimiques. — Dans tout ce qui précède, on s'est borné à considérer les effets *mécaniques* des agents extérieurs. Mais ce n'est pas à cela que se borne leur intervention. Les eaux courantes ne sont jamais pures et renferment des principes qui leur permettent de dissoudre une partie des éléments des terrains qu'elles arrosent. Les eaux d'infiltration, contenant pour la plupart de l'acide carbonique emprunté à l'air, dissolvent dans leur parcours souterrain des éléments minéraux, qu'elles vont déposer plus tard aux points d'émergence des sources, ou qu'elles conduisent en dernière analyse dans le grand réservoir de la mer, au fond duquel ces substances peuvent se déposer, soit par réaction mutuelle, soit par évaporation. Enfin les eaux marines, riches en sels dissous,

sulfate de chaux, chlorure de sodium (sel marin), chlorures et bromures de potassium et de magnésium, qu'elles peuvent abandonner en s'évaporant, sont aussi capables d'attaquer en partie les roches qui subissent une trituration dans leur sein, et de se charger ainsi de carbonate de chaux ou de silicates alcalins. De là résultent des *dépôts chimiques*.

Action des eaux météoriques. — L'eau de pluie ou *eau météorique* étant toujours chargée d'oxygène, son rôle principal consiste à oxyder les roches qu'elle traverse. Cet effet est surtout sensible sur les terrains qui contiennent du fer, et qui prennent, par la suroxydation de cet élément, une teinte rouge ou brune caractéristique.

Les calcaires sont attaqués par l'eau de pluie, à la faveur de l'acide carbonique qu'elle contient. Sous cette influence, les fentes naturelles du terrain s'élargissent par corrosion des parois. En débouchant à l'air, les eaux qui tiennent du calcaire en dissolution l'abandonnent par évaporation et ainsi se forment, surtout par incrustation progressive autour des mousses qui garnissent l'orifice des suintements, des *tufs*, tantôt terreux, tantôt compacts, avec coquilles d'animaux terrestres.

Quand l'évaporation des eaux calcaires est très lente, ce qui a lieu sur les parois des grottes et autres cavités, il se fait un dépôt concrétionné de carbonate de chaux, qui, en s'accroissant par couches concentriques, donne naissance aux incrustations connues sous les noms de *stalactites* et de *stalagmites*. Descendant de la voûte en pendentifs et en colonnes, ces incrustations, chaque jour accrues par de nouveaux suintements, forment sur le sol des grottes des *planchers stalagmitiques*, où sont empâtés les ossements et les déjections des animaux qui fréquentaient les cavernes.

L'activité de l'accroissement de ces revêtements est en rapport avec la puissance des infiltrations, c'est-à-dire avec l'abondance des pluies, et peut être entièrement entravée, soit par la gelée, soit par l'établissement d'un régime sec. Dans toutes les grottes renommées pour leurs ornements stalagmitiques (et dont quelques-unes sont encore parcourues par des cours d'eau souterrains), non seulement la majeure partie des

incrustations est de très ancienne date, mais encore sa formation remonte certainement à une époque où l'humidité était beaucoup plus abondante qu'aujourd'hui.

Les roches granitiques elles-mêmes, malgré leur dureté et le peu de solubilité de leurs minéraux, n'échappent pas à l'action prolongée des eaux météoriques. Peu à peu les silicates alcalins qu'elles renfermaient sont entraînés, laissant un résidu argileux, analogue au *Kaolin* ou terre à porcelaine. En même temps la roche perd sa cohésion et se tranforme à la surface en un sable grossier meuble, qualifié d'*arène*. C'est surtout dans les régions tropicales, exposées à des pluies abondantes et chaudes, que cette altération des roches cristallines se produit sur une grande échelle. Elle engendre un dépôt superficiel très ferrugineux, qualifié de *latérite*.

Beaucoup de granites contenant des parties plus dures et plus résistantes que le reste de la masse, le progrès de l'altération à l'air isole ces parties sous la forme de gros blocs généralement arrondis. Il en résulte parfois des apparences bizarres, notamment des superpositions de rochers en équilibre instable, où l'imagination populaire aime à reconnaître l'intervention des géants; tandis que la situation des blocs résulte simplement de ce que les eaux courantes ont enlevé peu à peu l'arène meuble au milieu de laquelle les parties dures étaient disséminées. Ces apparences sont donc un effet combiné de l'action chimique et du ruissellement.

Action de l'eau de mer. — Les eaux courantes enlèvent chaque année à la terre ferme, par simple dissolution, et amènent dans la mer, une proportion de matières minérales qui paraît n'être pas beaucoup inférieure à *cinq kilomètres cubes*. De ces substances dissoutes, les carbonates de chaux et de magnésie forment à eux seuls la moitié, et un dixième revient à la silice. Un autre dixième appartient aux sulfates de chaux, de soude et de potasse. La mer subirait donc un enrichissement continuel de ces matières, si quelques causes ne venaient contre-balancer l'effet d'un tel apport. La première de ces causes est l'évaporation dans les lagunes des pays chauds.

L'évaporation naturelle de l'eau de mer a pour conséquence

le dépôt du *sulfate de chaux* ou *gypse*, quelquefois précédé par une précipitation de *carbonate de chaux*, substance encore moins soluble. Si la concentration s'accentue encore, le *sel marin* se dépose à son tour en petits cristaux blancs (réaction que l'homme régularise par la création des *marais salants*); après quoi peut venir le tour des chlorures et sulfates de potassium et de magnésium.

Dans les mers très chaudes, l'évaporation sur les rivages suffit pour déposer, sur les grains de sable de la plage, une incrustation de carbonate de chaux, qui en fait de véritables pierres. Le même carbonate peut aussi agglomérer les galets des plages en *poudingues*. D'autres fois, comme au bord des dunes, c'est une eau chargée de sels végétaux qui, s'infiltrant dans les sables et arrêtée à une profondeur déterminée, en fait un *grès* d'un brun noirâtre, connu sous le nom d'*alios*.

Dans les mers profondes, où aucun sédiment détritique ne parvient, les dragages ont montré qu'il se formait une argile rougeâtre, par décomposition des éléments volcaniques du fond. S'il y a sur ce fond des corps étrangers, tels que des dents de requins ou des os de baleines, il se dépose à leur surface un enduit brun d'oxyde de fer et de manganèse. Cet enduit s'accroît avec une extrême lenteur, par couches concentriques successives et finit, à la longue, par donner naissance à des concrétions arrondies ou *nodules manganésifères*, abondants sur le lit du Pacifique par des profondeurs voisines de 5 000 mètres.

Mais toutes ces réactions laissent encore subsister, dans les eaux de la mer, un notable excès de substances dissoutes, provenant de l'apport des fleuves. Cet excédent demande à être fixé par un procédé différent des actions mécaniques et physiques. C'est à quoi répond l'activité des organismes marins, dont il sera question un peu plus loin.

Résumé. — En résumé, comme toutes les autres manifestations de la dynamique externe que nous avons déjà examinées, l'action chimique est double et comporte un phénomène de *destruction*, suivi d'un phénomène de *reconstitution*. Le premier s'exerce aux dépens de la terre ferme, s'attaquant à des portions que ni l'air, ni la mer, ni l'action mécanique des

eaux courantes ne pourraient atteindre, pour leur enlever quelques-uns de leurs éléments constituants. Ces derniers accomplissent alors un certain parcours de haut en bas, jusqu'au jour où une nouvelle action, physique ou chimique, les fixe, pour quelque temps au moins, dans une meilleure situation d'équilibre, en les incorporant de nouveau, mais à une moindre distance du centre commun d'attraction, à la partie solide de l'écorce.

§ 7

ACTION DES ÊTRES VIVANTS

Caractères généraux de l'action des êtres vivants. — En analysant la manière d'être des agents extérieurs, nous les avons constamment vus tendre, comme d'eux-mêmes, vers un état d'équilibre relatif dans lequel, si les circonstances extérieures demeuraient les mêmes, leur puissance mécanique serait, sinon annihilée, du moins considérablement réduite.

Dans les régions où cet équilibre est établi, le jeu de la dynamique externe n'est pas pour cela suspendu. Mais il revêt une forme nouvelle, caractérisée par l'intervention des *êtres vivants*. Non seulement les organismes, animaux ou végétaux, prennent possession des sols ou des rivages devenus assez stables pour que leur édifice délicat puisse y subsister; mais il est un bon nombre d'entre eux qui s'appliquent à accroître l'écorce solide du globe, en la faisant profiter, soit des substances que l'action chimique avait entraînées dans les eaux douces ou salées, au risque d'en altérer la composition, soit même d'une partie des éléments de l'atmosphère, désormais fixés dans le sol sous une forme durable. Ainsi se constituent, par la simple accumulation des dépouilles d'une partie du monde vivant, de véritables *terrains*, dont le mode de formation est d'autant plus instructif, que nous y trouvons la clef des phénomènes qui ont présidé au dépôt des *calcaires* et des *combustibles minéraux*; les calcaires, avec lesquels l'homme construit la plupart de ses édifices; les combustibles minéraux, qui seuls ont rendu possible le développement de l'in-

dustrie moderne. Comme s'il était entré dans les vues de la Providence d'employer, pour la préparation de ces matériaux, si caractéristiques de l'état de civilisation, quelque chose de plus relevé que la simple intervention des forces physiques et mécaniques!

Mode de formation de la tourbe. — Ce qu'on peut appeler l'action géologique des organismes terrestres se traduit de diverses manières : mais nous n'envisagerons ici que le travail des végétaux, parce qu'il est le seul qui s'exerce sur une échelle considérable, en donnant naissance au combustible minéral connu sous le nom de *tourbe*.

La tourbe est le produit de la décomposition sous l'eau de certains végétaux, parmi lesquels dominent, avec les cypéracées du genre *Carex* ou laiches, les mousses et spécialement les *sphaignes*. Les mousses tourbeuses exigent pour se développer une eau limpide et une atmosphère humide, avec une température moyenne qui ne dépasse pas 8 degrés centigrades. Quand ces conditions sont remplies, les sphaignes poussent avec une grande vigueur, en absorbant une quantité d'eau considérable, et meurent du pied pendant que leur tête continue à croître. Mais la décomposition de la partie inférieure s'accomplissant à l'abri de l'air, une partie seulement de la matière végétale se consume. Le reste forme un produit combustible de couleur brune, contenant de 58 à 60 pour 100 de carbone, et où la structure organique devient de moins en moins reconnaissable, à mesure que la transformation est plus avancée. En même temps la compacité augmente progressivement.

La rapidité d'accroissement de la tourbe est très variable. Dans le Jura, elle oscille entre 0 m. 60 et 3 mètres par siècle. Mais cet accroissement n'est pas indéfini, et quand le bassin tourbeux jurassien, qui a débuté par des laiches, pour continuer par des mousses bryacées et des sphaignes, est suffisamment exhaussé, les bruyères s'y installent et la tourbe cesse de se former.

Répartition des tourbières. — Pourvu que l'atmosphère soit humide, la température peu élevée et l'eau toujours limpide, la nature et la pente du sol importent peu à la forma-

tion des tourbières. On en trouve sur le fond plat des vallées à versants perméables, dans les dépressions des hautes vallées jurassiennes, mais aussi sur des pentes assez raides, sur des amoncellements de blocs granitiques, parfois même sur des escarpements où la tourbe est suspendue et aérienne. En revanche, l'arrivée d'eaux limoneuses dans un bassin tourbeux suffit pour arrêter immédiatement la végétation des mousses.

Les tourbières atteignent leur principal développement dans les régions tempérées froides. Tandis que, dans le Jura et les Vosges, on n'en voit guère au-dessous de 800 mètres d'altitude, elles occupent d'immenses espaces presque au niveau de la mer en Irlande, en Écosse, dans l'Allemagne du Nord et dans l'ouest de la Russie. C'est là que, sous l'influence d'un climat humide mais moyennement rigoureux, sur un sol dépourvu de pentes caractérisées, se forment ces grands marais tourbeux, dont le centre finit par être plus élevé que les bords, parce que la croissance des mousses y est plus active, et où les grandes pluies provoquent le gonflement et le débordement du marais.

Les vallées crayeuses du nord de la France ont leur fond garni de tourbe, parce que les rivières qui les arrosent, uniquement alimentées par des sources, n'ont pu combler leur ancien lit majeur ni avec du sable, ni avec du limon. Les versants, qui sont essentiellement perméables, laissent partout suinter des eaux limpides qui, cheminant sans vitesse appréciable sur le fond plat de la vallée, sont dans les conditions voulues pour l'établissement d'une végétation tourbeuse.

Modes divers de formation de combustibles minéraux. — Ce n'est pas en raison de leur composition chimique que les mousses sont le principal agent de la formation de la tourbe; car cette composition diffère très peu de celle de la fibre ou de l'écorce du bois. C'est parce que les mousses sont des plantes qui s'accommodent le mieux des conditions physiques sous l'empire desquelles s'opère de préférence la transformation en combustible de la matière végétale. Mais cette transformation peut avoir lieu dans d'autres circonstances, notamment lorsqu'une forêt a été détruite par un ouragan et que ses débris enchevêtrés, tombés en travers des cours d'eau, ont été noyés

par le débordement de ces derniers. Dans ce cas, c'est la fibre et l'écorce du bois qui se décomposent, et si le produit final n'a pas exactement la même texture que la tourbe de mousses, du moins il en diffère très peu par sa teneur en carbone, hydrogène et oxygène.

Même dans les pays chauds, où l'ardeur du soleil empêche, par l'évaporation qu'elle provoque, l'établissement des tourbières, un combustible fossile peut encore se former dans les deltas des grands fleuves. Tantôt c'est par le dépôt des troncs d'arbres et autres plantes, flottés en temps de crues; tantôt c'est par l'enfouissement périodique, sous de nouvelles alluvions vaseuses, des végétations de roseaux, de cyprès, même de chênes verts, qui avaient réussi à se développer, dans l'intervalle de deux crues exceptionnelles, sur des atterrissements de récente formation. Ce phénomène s'est répété fréquemment à l'embouchure du Mississipi, et il est probable qu'à d'autres époques géologiques ce mode de dépôt a dû jouer un rôle plus considérable.

Dépôts marins formés par les foraminifères et les diatomées. — Tandis qu'à la surface des continents, les végétaux, et surtout ceux d'ordre inférieur, s'appliquent non seulement à fixer dans le sol des éléments, carbone, hydrogène et oxygène, primitivement contenus dans l'air, mais encore à emmagasiner dans l'écorce du globe, sous forme de combustibles, une partie de l'énergie solaire qui les avait fait croître, un travail également remarquable s'accomplit dans les océans, sous l'influence des animaux les moins élevés en organisation. Par eux les sels de chaux en excès dans l'eau de mer sont décomposés et employés à construire des enveloppes calcaires, dont l'accumulation fait naître à la longue de puissantes assises dites *zoogènes*.

Près des rivages, cette fonction est souvent remplie par des algues calcaires, dites *nullipores*. Loin des côtes, dans ces espaces pélagiques où nous avons vu que la sédimentation mécanique ne pouvait plus s'exercer, les eaux superficielles nourrissent, surtout dans les régions chaudes, une abondante population d'êtres microscopiques, appelés *foraminifères*. Parmi eux dominent les *globigérines*, munies d'enveloppes cal-

d'hui que dans la zone tropicale), les récifs prospèrent au voisinage des côtes, s'exhaussant en moyenne de 1 à 2 millimètres par an, jusqu'à ce qu'ils aient atteint le niveau de la basse mer; car les polypiers ne peuvent supporter une émersion trop prolongée. A ce moment le travail des organismes prend fin et le récif se signale à haute mer par une ligne de brisants. Mais la conquête du massif au profit de la terre ferme n'est pas encore complète. C'est aux vagues de tempêtes à achever l'œuvre, en détachant, du bord du récif, de gros fragments de roche corallienne, déjà perforés par des mollusques *lithophages*, et en les projetant à la surface. Par là le récif s'élève peu à peu et parvient enfin à dépasser en quelques points le niveau des hautes eaux. Bientôt le vent et la mer y apportent des semences végétales, et il ne reste plus à l'homme qu'à prendre possession de ces îlots.

On constate que les coraux et, avec eux, les récifs, se développent mieux du côté de la haute mer, c'est-à-dire là où ils reçoivent les chocs les plus violents. Suivant les circonstances, les récifs sont collés à la côte qui a fourni la plate-forme nécessaire à leur premier établissement (*récifs frangeants*), ou séparés d'elle par un canal assez large (*récifs-barrières*), ou enfin tout à fait annulaires et enfermant une lagune intérieure (*atolls*). De toutes manières, en même temps qu'ils représentent une conquête opérée sur la mer par les êtres vivants, ils forment, autour des îles qui leur servent d'appui, une ceinture protectrice, amortissant le choc des vagues, sous l'effort desquelles beaucoup de ces îles, composées de matériaux peu cohérents, n'eussent pas tardé à disparaître.

Roches coralliennes diverses. — Tandis que le bord des récifs est constitué par un mélange de coraux en place et de menus débris, cimenté en un calcaire compact, les parties tournées vers l'intérieur, et auxquelles a manqué le choc violent des vagues, donnent naissance à un calcaire plus tendre, les interstices des coraux ne pouvant être comblés que par une sorte de vase crayeuse. La plage même est occupée par des sables coralliens, composés de menus morceaux roulés. Souvent les infiltrations, aidées par la puissante évaporation des contrées tropicales, amènent, autour de ces grains de

sable, le dépôt d'enveloppes concentriques de carbonate de chaux, donnant naissance à des *oolithes*, ainsi nommées de leur ressemblance avec des œufs de poissons. Enfin la même cause, en agglomérant les sables à oolithes, les transforme en *calcaires oolithiques*. Quant à la zone située au large des récifs, il s'y dépose une *vase calcaire* blanche à grain impalpable.

Épaisseur des récifs. — D'après ce qui a été dit précédemment, aucun récif corallien ne devrait avoir plus d'une quarantaine de mètres d'épaisseur. Cependant il arrive quelquefois que ce chiffre soit notablement dépassé. Voici comment on peut s'en rendre compte[1] :

La plupart des récifs polynésiens ont pour base des cônes volcaniques sous-marins, rasés par les vagues juste à la hauteur qui convient à l'établissement des espèces coralligènes, et qui est aussi celle où cesse la puissance mécanique des lames. Au pied du *bord vivant* du récif, qui souvent est vertical, la sonde rencontre un talus escarpé, formé par un entassement de blocs calcaires, que les vagues de tempêtes ont détachés du couronnement du récif et jetés sur la pente raide du cône sous-jacent. Ce talus, cimenté à la longue en une masse solide, grâce à la chute de menus fragments dans les intervalles des blocs, peut fournir par sa crête une nouvelle plate-forme, propre à servir d'assiette à des coraux. De cette manière, le récif avancerait vers la pleine mer, reposant alors sur un soubassement formé de ses propres débris et dont rien, *a priori*, ne limite la hauteur. D'ailleurs, la croissance du récif étant plus rapide du côté de la pleine mer, le bord extérieur d'une construction corallienne pourra s'élever plus vite et dépasser seul le niveau de l'eau. Ainsi une ancienne plate-forme se transformera naturellement, en un récif annulaire ou atoll.

D'autres fois, au lieu de s'élever directement sur une plate-forme, volcanique ou non, le récif se développera au-dessus d'un banc calcaire, préalablement édifié par des foramini-

1. Voir les observations faites par Sir J. Murray dans la croisière du *Challenger*.

fères ou autres animaux; et les deux masses, en devenant compactes avec le temps, paraîtront n'en plus former qu'une seule.

En dehors de ces possibilités, l'accroissement en hauteur d'un récif est forcément interrompu dès que son couronnement atteint le niveau des mers moyennes, à moins qu'un affaissement du sol ne permette une nouvelle reprise du travail des coraux.

CHAPITRE III

DYNAMIQUE TERRESTRE INTERNE

§ 1

PHÉNOMÈNES VOLCANIQUES

Principe de la dynamique interne. — Le caractère commun de tous les agents extérieurs, c'est d'abord que leur action se partage en périodes, relativement courtes, de grande activité, séparées par des intervalles de repos, absolu ou relatif. C'est ensuite que tous tendent naturellement vers un état d'équilibre, dont l'établissement définitif réduirait à néant leur rôle dynamique. En particulier, l'érosion continuant à dégrader la terre ferme, celle-ci perdrait peu à peu son relief, en même temps que la mer l'envahirait, son niveau s'élevant en proportion de la quantité de matières solides qui viendraient s'appliquer sur le fond. De la sorte, aucun sédiment ne devrait apparaître au jour, le domaine où les dépôts s'accomplissent gagnant toujours sur la surface émergée.

On sait qu'il n'en est rien, et que cette surface, toujours pourvue d'un relief varié, abonde en dépôts stratifiés, c'est-à-dire en anciens fonds de mer, aujourd'hui incorporés à la

terre ferme et plus ou moins disloqués. Il faut donc qu'une cause soit intervenue pour troubler les états d'équilibre qui tendaient à s'établir.

Cette cause, qui agit encore manifestement de nos jours, a son siège dans les profondeurs du globe terrestre. Comme la dynamique externe consistait dans l'action des fluides extérieurs sur l'écorce, le principe nouveau dont l'analyse va nous occuper est l'effort que cette même écorce subit par suite de l'existence de fluides intérieurs, effort qui a pour résultat de modifier l'assiette et le relief de la terre ferme, ravivant sans cesse l'activité, prête à s'endormir, des puissances externes. Enfin, de même que le principe des phénomènes extérieurs est la chaleur solaire, de même la source d'où dérivent les actions internes est l'*énergie calorifique* propre au globe terrestre. La manifestation le mieux caractérisée de cette énergie s'offrant à nous sous la forme des *phénomènes volcaniques*, c'est par là que nous en aborderons l'examen.

Volcans. Éruptions. — Un *volcan* est un appareil par lequel la surface du globe est mise en communication, d'une manière continue ou intermittente, avec les matières ignées situées au-dessous de l'écorce, ou, pour mieux dire, avec les réservoirs d'énergie qu'abrite cette écorce.

Les volcans peuvent offrir des formes très variées; mais leur type le plus normal comporte une *cheminée*, ou canal d'ascension, qui vient déboucher, par une ouverture en forme de coupe ou *cratère*, au sommet d'une montagne conique. L'existence du foyer interne se traduit au sommet de la montagne par un dégagement de gaz, formant le *panache de fumée*, caractéristique des volcans actifs.

En temps ordinaire, le dégagement des fumées n'est accompagné que par d'insignifiantes explosions. Mais de temps à autre surviennent des *éruptions* violentes ou *paroxysmes* volcaniques. Tout d'abord, après quelques grondements préliminaires du sol, une colonne de vapeur d'eau s'élance verticalement avec une grande vitesse, jusqu'à une hauteur capable de dépasser *onze mille* mètres, entraînant avec elle des pierres et des cendres, qui retombent à droite et à gauche. Cette colonne est formée d'une rapide succession de nuages blancs ou gris,

qui montent l'un après l'autre vers le ciel, et dont chacun est le produit d'une explosion interne. Cette poussée gazeuse annonce toujours la montée de la lave dans la cheminée, et les cendres qu'elle entraîne ne sont autre chose que des fragments de la masse liquide, pulvérisée par l'expansion des vapeurs qui l'ont traversée. Entre les cendres et les nuages de vapeur d'eau, il se fait un échange constant d'électricité, sous la forme d'éclairs.

A la suite de cette grande manifestation explosive, la lave atteint le sommet du volcan. Alors, ou bien elle se déverse par-dessus le cratère, ou, ce qui est le cas le plus fréquent, la



Fig. 14. — Le Vésuve en juillet 1895 (d'après un croquis de M. Heim).

pression de la colonne ignée disloque le cône, formé de matériaux peu consistants, et y ouvre une fente, pour mieux dire une zone de crevasses, par où la coulée trouve une issue (fig. 14). Dans ce dernier cas, il se forme sur la fente plusieurs centres secondaires d'éruption, dont chacun projette, pendant quelques heures ou quelques jours, des cendres et des scories. L'accumulation de ces débris édifie des *cônes adventifs*, pouvant atteindre jusqu'à 300 mètres de hauteur.

Émission des laves. — Le fait capital des éruptions volcaniques est la sortie des *laves*. On appelle ainsi des coulées de matières fondues, de composition très variable, mais qui toutes sont formées de *silicates*, c'est-à-dire de substances analogues à celles qui constituent les laitiers de hauts fourneaux et les scories de forge. La silice y est unie au fer, à la

magnésie, à la chaux, à l'alumine et à des alcalis. Les coulées, en se refroidissant, donnent naissance à des roches solides.

Il y a des laves légères, riches en silice, et des laves lourdes, chargées d'éléments ferrugineux; quelques-unes sont très fluides et d'autres seulement pâteuses. Tantôt le refroidissement donne une roche compacte (laves *lithoïdes*) ou une roche vitreuse (laves vitreuses, *obsidiennes*) tout à fait analogue au verre à bouteilles; tantôt la lave solide est entièrement cristallisée ou montre des cristaux nets qui se détachent sur une pâte compacte. D'autres fois elle est parsemée de cavités dues à l'échappement des gaz (laves scoriacées, laves celluleuses, laves amygdaloïdes).

Les laves vitreuses se solidifient à la manière des laitiers de forge, en replis ondulés (laves *cordées*). Les laves peu fusibles se couvrent, dès leur arrivée à l'air, d'une croûte de scories incohérentes, qu'elles poussent devant elles en les heurtant les unes contre les autres, à mesure que le front de la coulée progresse, et qui donnent à la surface cet aspect raboteux et hérissé, si caractéristique des *cheires* d'Auvergne.

Vitesse, température et dimensions des coulées. — La vitesse de progression des coulées de lave est extrêmement variable. Tandis que les laves remarquablement fluides des îles Sandwich parcourent plusieurs mètres par seconde, la vitesse des coulées du Vésuve varie ordinairement entre 2 mètres et 1 centimètre dans le même temps.

La température des laves liquides est considérable et dépasse certainement *mille degrés*. Cependant leur action calorifique ne s'étend pas au delà d'un rayon très restreint et il en est qui, débouchant dans un bois de sapins, se sont contentées de carboniser les troncs, en se moulant autour de l'écorce dont elles conservaient l'empreinte. On a vu, à l'Etna, des laves couler, sans les fondre, par-dessus des champs de neige, dont les séparait seulement une couche de petites pierres et de cendres. Ce fait est remarquable et rien ne démontre mieux la faible conductibilité des roches que cette impuissance calorifique des laves, comparée à leur énorme température.

L'une des plus grandes coulées des temps modernes est celle qui s'est échappée en 1855 et 1856 du Mauna Loa aux îles Sandwich. Elle avait 100 kilomètres de long, 4 800 mètres de largeur moyenne et, en certains points, jusqu'à 108 mètres d'épaisseur. Au Vésuve, la coulée de 1794 représentait plus de 23 millions de mètres cubes. A l'île Bourbon, on a observé des coulées de 68 et même de 86 millions de mètres cubes.

Relation des laves et des débris projetés. — Les pierres projetées par les volcans sont, ou bien des débris du cône terminal, plus ou moins démoli par chaque explosion partielle, ou des morceaux de la croûte de scories qui recouvrait la lave dans le cratère, ou des fragments de la lave visqueuse qui remplit la cheminée de certains volcans d'une sorte de pâte semi-fluide, ou enfin ce qu'on appelle improprement des *cendres*, qui ne sont autre chose que de la lave solidifiée dans un grand état de division. Dans ce dernier cas, c'est la vapeur d'eau qui, en faisant explosion à travers la masse fondue, la réduit en gouttelettes; celles-ci, rapidement solidifiées à l'air, prennent, si la lave est vitreuse, cet état particulier qui caractérise les gouttes de verre fondu, brusquement refroidies par immersion, et qui les prédispose à éclater en menus fragments esquilleux. Les dimensions minimes de ces fragments et la force prodigieuse avec laquelle ils sont projetés leur permettent d'arriver dans les hautes régions de l'atmosphère, où les courants les emportent et leur font parcourir des espaces considérables.

Avec les laves très chargées de silice, les explosions de vapeur donnent naissance à des projections de *pierre ponce*, essentiellement poreuse et légère.

Formation des cratères. — Nous avons dit que la cheminée par laquelle ont lieu les projections principales et l'ascension des laves se termine ordinairement par un *cratère*. C'est une ouverture à peu près circulaire, qui, en général, tronque le cône de débris construit par le volcan lui-même à l'aide des matériaux rejetés. Ces matériaux, en effet, retombant autour de l'ouverture, y font naître une montagne conique, ordinairement très régulière, constituée de couches successives inclinées en moyenne de 35 à 10 degrés, et incessamment remaniée,

au moins à son sommet, lors des paroxysmes. Ainsi le cône du Vésuve est tantôt terminé par un véritable abîme cratériforme, de 700 mètres de diamètre avec une centaine de mètres de profondeur, au fond duquel la croûte qui recouvre la lave laisse s'élever des cônes secondaires, tantôt rempli jusqu'au bord par de la lave disparaissant sous une couche de scories, d'où s'échappent par plusieurs ouvertures des coulées débordant par-dessus le cratère. Parfois on a vu le sommet de



Fig. 15. — Le cône central du cratère du Vésuve, en 1888

l'ancien cratère, absolument rempli, servir de base à un plus petit cône (fig. 15), et même à deux cônes emboîtés l'un dans l'autre.

Le cratère terminal de l'Etna, également très variable, a été quelquefois entièrement démoli par une explosion, pour être reconstruit, tantôt simple, tantôt double, par les éruptions suivantes.

Quand le débordement des laves est le fait habituel, comme à l'île Bourbon, le cratère, au lieu de s'ouvrir au sommet d'un cône de débris projetés, est une ouverture qui s'est maintenue à travers une superposition de coulées successives (fig. 16), dont les tranches apparaissent sur les parois de la cavité. Au

fond bouillonne la lave, qui peut s'élever en temps d'éruption jusque par-dessus les bords, et dont les coulées visqueuses retombent et se figent en partie sur les parois intérieures, en forme de stalactites simulant des draperies.

Certains volcans ne rejettent jamais que des laves et en construisent à la longue des montagnes de très grande hauteur, mais à faible pente, comme le Mauna Loa et le Mauna

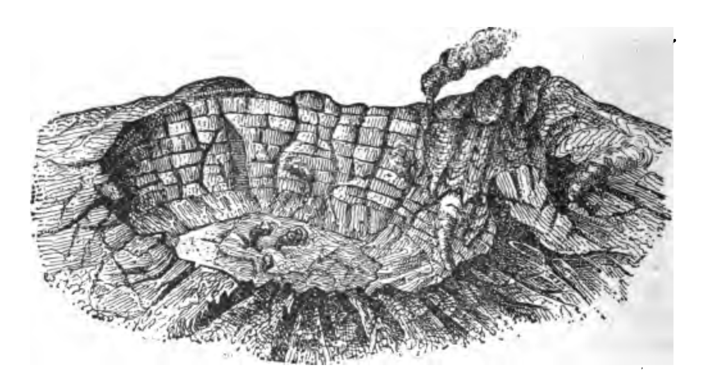


Fig. 16. — Cratère du Piton de la Fournaise (île Bourbon).

Kea des îles Sandwich, qui s'élèvent à plus de 4200 mètres.

Fragilité des cônes de débris. — Les cônes de débris, quand ils ne sont pas consolidés par l'injection ultérieure de laves, restent dépourvus de cohésion et sont menacés de disparaître plus ou moins vite sous l'effort des agents atmosphériques, la pluie ayant beau jeu, malgré leur perméabilité, pour y creuser des rigoles dans tous les sens. Aussi dans les pays tropicaux, comme à Java, voit-on les cônes des volcans inactifs se ruiner peu à peu par ravinement. Cependant cette destruction ne marche pas en général avec une grande rapidité, comme en témoigne la fraîcheur de la plupart des cônes de la chaîne du Puy de Dôme, en Auvergne, dont la formation a précédé les temps historiques.

Mais s'il s'agit de volcans situés en mer, les vagues peuvent les disperser en quelques semaines. C'est ce qui est arrivé en

1831, à l'île Julia, qui avait pris naissance subitement, par projection de débris, au sein de la Méditerranée. Si l'île Saint-Paul, dans l'océan Indien, a mieux résisté, bien que la mer ait libre accès dans son cratère inactif, c'est que les laves ont pris une grande part à sa formation. Bon nombre de cônes de débris ont été ainsi rasés par les vagues dans l'océan Pacifique et se sont changés en plates-formes sous-marines, propres à servir d'assiette aux constructions coralliennes.

Formation des montagnes volcaniques. Tufs. — A force de se répandre autour de l'ouverture, les coulées successives, mêlées aux débris projetés, exhaussent peu à peu le massif. Il en résulte à la longue des montagnes considérables, comme les volcans du Kamtchatka et du Japon, hauts de plus de 4000 mètres, ou comme l'Etna, qui dépasse 3 300 mètres.

Cette dernière montagne offre une *gibbosité* principale, constituée par un enchevêtrement de laves et de débris en couches, que domine le cône terminal, haut d'environ 300 mètres. Par suite de leur peu de consistance, les cônes de débris, ébranlés par les explosions, se fendent sous l'effort de la lave en pression dans la cheminée, et la matière fondue tend le plus souvent à s'échapper latéralement. C'est donc à la base du cône de débris que doit se former, par l'accumulation des coulées, un massif de moindre pente, tel que la gibbosité de l'Etna.

En outre, les pluies abondantes dont la chute accompagne les éruptions entraînent, sous forme de *déluges de boue*, des cendres et des pierres, et le tout s'agglomère au pied de la montagne en donnant naissance à des *tufs volcaniques*. Ce sont des formations qui participent, à la fois, des roches éruptives par leur nature et des terrains sédimentaires par leur mode de dépôt. Des tufs se forment encore, et avec une stratification plus parfaite, quand les débris projetés sont venus tomber dans un lac ou dans la mer. Tel est le cas des *tufs sous-marins* avec coquilles des environs de Naples, de certains *tufs ponceux* et de beaucoup de *cinérites* ou amas stratifiés de cendres, grises ou blanches, avec ou sans empreintes végétales.

De cette manière, un volcan normal doit offrir : 1° au pied, une pente très faible, formée de tufs; 2° au milieu, un bom-

bement plus accentué, où dominent les laves; 3° au sommet, la pente raide et régulière du cône terminal de débris.

Modes divers d'épanchement des laves. — Les laves offrent deux manières d'être distinctes : dans la première, elles ont *coulé à l'air libre*, soit par déversement, soit par une fente, et alors elles forment des *nappes* plus ou moins larges, d'une épaisseur assez uniforme, compactes à la base, celluleuses ou scoriacées en haut. Les coulées ont en général une inclinaison faible; cependant on a vu des laves couler et se solidifier sans irrégularités sur des pentes supérieures à 30 degrés. Dans le second mode, les laves, après avoir commencé par s'élever dans la cheminée, ont fini par y acquérir une pression considérable, qui a suffi pour les *injecter* dans les fissures du cône ou même dans celles du terrain qui porte ce dernier. Ce cas est fréquent à l'Etna, où l'on voit des fentes remplies par de véritables *filons* de lave, souvent verticaux et qui demeurent en saillie sur les escarpements (c'est ce qu'on appelle des *dykes*), lorsque l'érosion a fait disparaître en partie les matériaux meubles au milieu desquels la lave s'était introduite. Mais les fentes d'injection ou d'*intrusion* ne sont pas nécessairement verticales, et il peut très bien arriver que, la cheminée centrale ayant été remplie par une haute colonne de lave, la matière liquide trouve à s'échapper *entre deux couches de débris*, en partageant leur inclinaison. Alors la lave injectée se consolide sous la forme d'une nappe, qui semble avoir coulé librement sur la pente même du cône, mais qui reste compacte dans toute sa masse à cause de la pression sous laquelle s'est opérée sa solidification.

Enfin les volcans à débordement de lave dont le cône a une très forte pente, comme le Cotopaxi, donnent naissance à des coulées *discontinues*. La lave, trop visqueuse pour pouvoir se concentrer en un courant défini, se solidifie par portions et on la retrouve, au pied du cône, à l'état de traînées de gros blocs.

Cumulo-volcans. — Un mode particulier d'émission de laves est offert par certains volcans, tels que celui de Santorin, dans l'Archipel grec. Les explosions et les coulées, d'ailleurs très intermittentes, y ont toujours été précédées

par une période d'*intumescence* se traduisant par l'apparition, au milieu de la baie de Santorin, d'îlots formés par des blocs à demi incandescents d'une lave visqueuse, très siliceuse. On doit admettre que, vu la faible fusibilité de la lave, sa solidification se fait à moitié dans la cheminée, où elle forme une sorte de tampon de matière pâteuse. A chaque éruption, l'effort des gaz intérieurs doit soulever ce tampon comme une ampoule, avant de s'y ouvrir un chemin qui permette les projections violentes de scories et de cendres ainsi



Fig. 17. — La nuée ardente du 25 janvier 1903, descendant dans la vallée de la Rivière Blanche. (Photographie de M. Lacroix).

que les vraies coulées de lave. C'est probablement un phénomène de ce genre qui a donné lieu, en 1902, à la désastreuse éruption de la Martinique.

C'est à cette catégorie d'appareils éruptifs, qualifiés de *cumulo-volcans*, qu'appartient essentiellement la Montagne Pelée de la Martinique, dont l'éruption de 1902-1903 a été si désastreuse. Il s'est formé dans l'ancien cratère un dôme d'intumescence, qui a dépassé de 300 mètres l'altitude primitive du sommet, sans donner lieu à aucune coulée.

Emprisonnés sous cette carapace, les gaz en pression

s'échappaient de temps en temps, par les déchirures de l'enveloppe, sous forme de jets horizontaux de *nuées denses*. Ces nuées descendaient le long du cône (fig. 17) comme des pro-

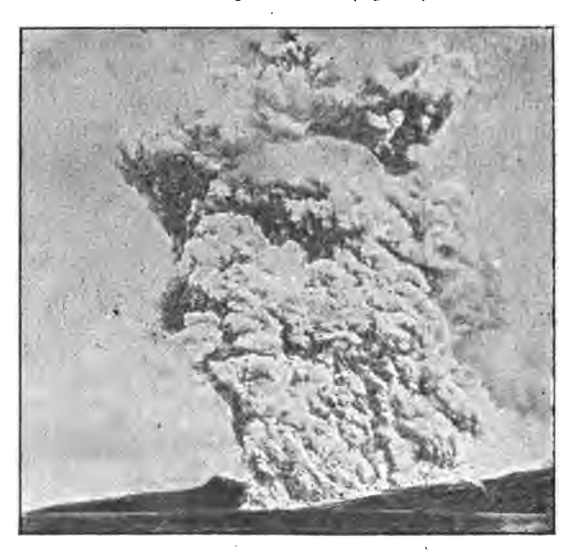


Fig. 18. — Nuée ardente arrivant à la mer.

jectiles de vapeurs et de cendres, s'épanouissant peu à peu jusqu'à atteindre au moment de leur arrivée à la mer, une hauteur de 4 kilomètres (fig. 18). C'est la première de ces nuées qui a foudroyé en quelques instants la ville de Saint-Pierre.

Modes divers de l'activité volcanique. — L'activité des volcans comporte des manifestations très diverses. La plus habituelle consiste dans une succession irrégulière de paroxysmes, séparés par des périodes de repos, et d'autant plus violents, en général, que ces intervalles ont été plus longs. Ainsi les deux plus fortes éruptions du Vésuve furent celles de 79, où périt Pline et qui était la première révélation du volcan depuis les temps historiques; ensuite celle de 1631, précédée par plusieurs siècles d'inaction.

Il y aussi des volcans en éruption constante, comme le Stromboli, mais où les explosions et les épanchements de lave ne dépassent jamais un certain degré d'intensité, si bien que cet état d'activité modérée, mais permanente, a pu être qualifié de *mode strombolien.* Aux îles Sandwich, la lave ne cesse de bouillonner tranquillement dans la chaudière de Kilauea, bien que celle-ci se vide parfois pour un temps et que son niveau subisse de grandes oscillations. Mais les projections et les explosions font absolument défaut. Au contraire, à Java et dans les îles voisines, il n'y a pas d'émissions de lave liquide; mais les projections sont d'une extrême violence. L'explosion du Timboro, en 1815, a jeté, sur un rayon de 500 kilomètres, une masse de débris évaluée à plusieurs centaines de kilomètres cubes. Celle de Krakatoa, survenue en 1883, a projeté en deux jours 18 kilomètres cubes, et l'effondrement qui en a été la conséquence a fait naître dans la mer une immense vague de 15 à 25 mètres de hauteur, pénétrant sur les côtes de Sumatra et de Java jusqu'à 3 kilomètres dans l'intérieur des terres et causant la mort de trente à quarante mille habitants.

Cratères d'explosion et d'effondrement. — Ces explosions extraordinaires rendent facilement compte d'une structure propre à certains volcans et qui consiste dans l'existence d'une sorte de *rempart* circulaire plus ou moins complet, entourant à quelque distance le cône principal. Le type de ces remparts est réalisé, au Vésuve par la Somma (fig. 19), à l'île Bourbon par l'*Enclos* du Piton Bory (fig. 20), aux îles Canaries par la célèbre chaudière ou *Caldeira* de Palma.



Fig. 19. — Le Vésuve et la Somma.

De telles ouvertures doivent être considérées comme le résultat d'explosions gigantesques, parfois accompagnées d'effondrements, ayant fait sauter comme à la mine le sommet d'un ancien volcan, plus grand que le cône actuel, lequel a été ultérieurement édifié par des projections de l'ouverture béante. Cette explication pourrait convenir à la formation du grand cirque de Santorin. C'est aussi par explosion que

paraissent avoir pris naissance les célèbres *cratères-lacs* ou *maare* de l'Eifel, la cavité du lac de Tazenat en Auvergne, peut-être enfin les lacs d'Albano et de Nemi, dans le Latium. Pour quelques-unes de ces cavités, le fait de l'explosion n'est pas douteux; car elles sont ouvertes au milieu de terrains qui n'ont rien de volcanique et l'on trouve disséminées sur leurs bords quelques scories, parfois des pierres vitrifiées prove-

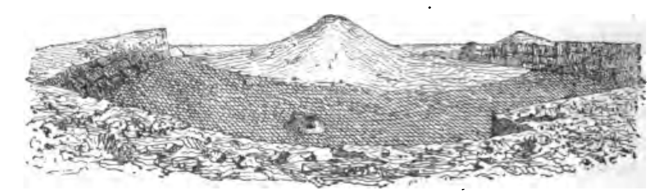


Fig. 20. — L'Enclos et le Piton Bory.

venant du terrain sous-jacent. Il est donc évident qu'elles ont pris naissance à la suite d'explosions et qu'on peut les regarder comme des volcans avortés, où la projection des gaz et des pierres n'a pas été suivie par l'émission de laves.

D'autres fois, des cavités arrondies se seront produites par simple effondrement, une coulée de lave s'étant solidifiée au-dessus d'un terrain peu cohérent, qui s'est écroulé plus tard; ou bien encore, comme aux îles Sandwich, une lave très chaude, injectée à travers les fentes d'une ancienne coulée, l'aura partiellement refondue, entraînant l'effondrement de la surface.

Fumerolles. — Pour terminer l'énumération des phénomènes qui sont sous la dépendance immédiate de l'activité volcanique, il reste à parler des *émanations gazeuses* tranquilles qui accompagnent et suivent la sortie des laves, faisant naître, sur les fentes, les dégagements de fumées auxquels on a donné le nom de *fumerolles.*

Ces émanations ont une importante capitale. Par la façon dont elles s'accomplissent, elles attestent l'union intime des vapeurs et de la matière fondue. Les premières ne doivent donc pas être considérées comme un hors-d'œuvre accidentel, dû à la réaction de la lave qui monte sur les fluides que l'in-

filtration a fait pénétrer dans l'écorce. Incorporées à la masse ignée, ce sont elles qui l'ont entraînée au jour, où la diminution de la pression va maintenant les disperser dans l'atmosphère.

De la lave très chaude se dégagent d'abord, *par simple évaporation sans bouillonnement*, des fumerolles blanches et *sèches*, à très haute température, formées surtout de *sel marin* en vapeurs. Plus tard on voit apparaître, près des parois de la coulée, des émanations de vapeur d'eau à 300 ou 400 degrés, rendues *acides* par la présence des gaz chlorhydrique et sulfureux. Plus loin encore du foyer principal d'éruption, les fumerolles sont *alcalines* et chargées de sel ammoniac (sans que la vapeur d'eau cesse de prédominer de beaucoup), avant de devenir *froides* et de n'être plus guère composées que de vapeur d'eau au-dessous de cent degrés, mêlée à de l'hydrogène sulfuré. Enfin la série des émanations se termine par des *mofettes*, ou dégagements d'*acide carbonique*, qui durent souvent des mois entiers après la fin des éruptions et même, dans certaines contrées autrefois volcaniques, survivent depuis de longs siècles à l'extinction des foyers éruptifs. L'acide carbonique, en raison de sa plus grande densité, s'accumule sur le sol, et c'est ainsi qu'à Naples, dans la célèbre *grotte du Chien*, les animaux de petite taille sont asphyxiés, tandis que la couche de gaz irrespirable n'est pas assez haute pour incommoder un homme.

Quand les fumerolles froides, au lieu de se dégager d'une fente à l'air libre, sont obligées de traverser d'abord une certaine épaisseur d'eau, on y constate la présence de l'*hydrogène* et celle des *hydrocarbures*, ou composés d'hydrogène et de carbone. Il est donc permis de penser que les gaz venant de l'intérieur du foyer incandescent s'oxydent dans les fissures, au contact de l'air, et que, dans leur état primitif, ce sont des vapeurs *combustibles*, se dégageant d'un milieu où domineraient les influences *réductrices*, c'est-à-dire contraires à l'oxydation.

Les substances *métalliques*, surtout le *fer* à l'état de chlorure, l'*acide borique*, les sulfures d'*arsenic*, doivent aussi être mentionnés parmi les produits gazeux des volcans.

Distribution des volcans. — Les volcans se rencontrent dans toutes les conditions possibles de longitude et de latitude. Il en existe près des pôles comme à l'équateur, et on en peut trouver sous n'importe quel méridien.

Cependant la distribution n'en est aucunement arbitraire. En premier lieu, l'intérieur des continents *actuels* ne renferme presque aucun volcan actif. En revanche, les rivages de la mer sont souvent marqués par des lignes continues de bouches éruptives. On peut dire que l'océan Pacifique est entouré par un véritable *cercle de feu*. Ce cercle commence à la Nouvelle-Zélande et se poursuit, par les Nouvelles-Hébrides, les îles Salomon et les îles de la Sonde, jusqu'au Japon. De là, par les Kouriles, il gagne le Kamtchatka, suit les Aléoutiennes, la côte occidentale de l'Amérique, le Mexique, le Guatemala, longe toute la chaîne des Andes et se referme par les îles Shetland et les cratères antarctiques Erebus et Terror. L'axe de l'Atlantique est jalonné par le volcan de Jan Mayen, ceux de l'Islande, des Açores, des Canaries, du Cap-Vert, d'Ascension, de Sainte-Hélène, de Tristan d'Acunha.

D'autre part, une ligne volcanique transversale se suit d'un bout à l'autre du globe, comprenant les Antilles, les Canaries, les volcans méditerranéens, le Caucase, les cratères de l'océan Indien, ceux de la Polynésie, des îles Sandwich et des Galapagos. De plus, c'est un fait digne de remarque que l'activité volcanique est tout particulièrement énergique dans les régions centrales de l'Amérique et aux îles de la Sonde, c'est-à-dire aux points de rencontre de la ligne transversale avec le cercle de feu du Pacifique.

Coïncidence des volcans avec les lignes de dislocation. — Si la situation littorale ou insulaire des volcans est incontestable, ce n'est pas cependant par elle-même et directement que la mer intervient dans le phénomène volcanique. En effet, il importe de ne pas oublier que les volcans font défaut sur toutes les côtes plates ainsi qu'au voisinage des mers sans profondeur. On en chercherait vainement sur la Baltique ou sur la mer du Nord. Ils sont absents de toute la côte atlantique des États-Unis, comme de celle des Guyanes et du Brésil, et il n'en existe pas davantage sur les rivages de la Sibérie ni sur ceux de l'Australie.

Les lignes de côtes ou d'îles jalonnées par les volcans sont celles qui bordent de hautes chaînes, formant, comme les Andes, une brusque saillie, ou celles qui marquent le contour rectiligne d'une dépression océanique au flanc abrupt. Telles sont la côte asiatique du nord-est, au large de laquelle la sonde enregistre, à peu de distance, les plus grandes profondeurs du Pacifique septentrional, et la ligne des Antilles, crête en partie émergée d'un bourrelet, au delà duquel le fond de l'Atlantique descend plus vite et plus bas que partout ailleurs. De même, la grande ligne volcanique transversale que nous avons mentionnée coïncide avec cette dépression méditerranéenne, qui nous a paru constituer l'un des traits fondamentaux de la géographie actuelle, et dont la direction concorde avec celle du système de plissements qui comprend la chaîne alpine, l'Himalaya et les Antilles.

On peut donc dire que *les volcans sont établis sur les grandes lignes de dislocation* de l'écorce terrestre, absolument comme les cônes adventifs jalonnent le parcours des fentes à chaque éruption de l'Etna. Ils caractérisent les plus saillants parmi les bourrelets par lesquels sont limités les compartiments affaissés de la croûte solide, et il est naturel de penser que chaque bouche volcanique principale doit marquer un élargissement ou un croisement de fentes, ouvrant une voie plus facile à la sortie des fluides qui bouillonnent sous l'écorce.

Quant à la source de ces fluides et aux causes qui en déterminent la sortie, il convient d'attendre, pour émettre une hypothèse à cet égard, que nous ayons achevé la revue des manifestations de la Dynamique interne.

§ 2

PHÉNOMÈNES THERMAUX

Définition des phénomènes thermaux. — L'activité interne est loin d'avoir dit son dernier mot avec la projection des débris, la sortie des laves et l'émission des fumerolles. Longtemps après que tout paroxysme a cessé dans une contrée, il s'y produit en divers points des dégagements de

vapeurs et de liquides à haute température, qu'on peut grouper sous la commune dénomination de *phénomènes thermaux*. Leur caractère essentiel est d'être localisés dans le voisinage immédiat des anciens centres volcaniques et de former la suite naturelle, sans cesse atténuée en intensité, des manifestations paroxysmales; absolument comme la succession ordonnée des fumerolles, depuis celles qui sont sèches et très chaudes jusqu'aux mofettes, marque la décroissance progressive de chaque éruption.

Solfatares. — De tous les phénomènes thermaux, ceux qui se rapprochent le plus de l'activité volcanique normale consistent en dégagements violents de vapeur d'eau, accompagnés de gaz dont l'odeur suffocante, jointe aux dépôts jaunâtres qui garnissent les orifices de sortie, trahit les composés du *soufre*. Aussi les désigne-t-on sous le nom générique de *solfatares* ou *soufrières*.

La solfatare la plus connue est celle de Pouzzoles, près de Naples, qui occupe un cratère dont la dernière éruption a eu lieu en 1198. Les gaz sulfureux, se transformant en acide sulfurique par l'action de l'air et de l'eau, attaquent les roches, décomposent les silicates et font naître de l'*alunite*, ou pierre d'alun, ainsi que des efflorescences de sulfates divers. La décomposition de l'hydrogène sulfuré donne lieu aussi à des dépôts de *soufre natif*.

Les *soufflards* ou *soffioni* de la Toscane, qui forment des jets de 10 à 20 mètres de hauteur, alignés sur des fentes, et dont les bassins renferment de l'*acide borique*, sont aussi des solfatares. Il en est de même des jets de vapeur, dits *Steamboat Springs* ou *sources du bateau à vapeur*, de Californie. Seulement les gaz sulfurés y sont moins abondants que dans les solfatares typiques.

Un ancien volcan peut passer définitivement à l'état de solfatare, en attendant qu'une nouvelle diminution locale de l'activité interne le réduise à n'être plus qu'une mofette; mais il peut aussi, après s'être maintenu quelque temps dans cette condition, entrer de nouveau en éruption. Le *mode solfatarien* caractérise donc, dans le volcanisme, une phase de décroissance, mais qui n'exclut pas absolument tout retour au passé.

Geysers. — A la catégorie précédente se relient étroitement les *geysers*, si développés en Islande, en Nouvelle-



Fig. 21. — Le Grand Geyser du Yellowstone en éruption, en 1878.

Zélande et surtout dans le Parc National du Yellowstone en Amérique. Ce sont des dégagements intermittents, non plus

de vapeur, mais d'eau chaude, projetée avec violence à des hauteurs qui peuvent dépasser 60 mètres (fig. 21) et donnant lieu, autour des orifices, à d'abondants dépôts concrétionnés de *silice hydratée*, dite aussi *opale commune* ou *geysérite*.

L'eau provient, au moins pour partie, des infiltrations et sa température résulte de ce que cette eau est traversée par des émanations très chaudes, issues d'un foyer volcanique sous-jacent.

Les éruptions des geysers, toujours très courtes, sont intermittentes et se succèdent à des intervalles variables. Cette intermittence s'explique, d'abord par l'obligation de reconstituer à l'aide des infiltrations, après chaque paroxysme, le volume et la température de l'eau nécessaire à la formation de la gerbe; ensuite par l'échauffement très inégal des divers points de la cheminée d'ascension. En effet, certaines portions de celle-ci, plus directement léchées par les gaz intérieurs, peuvent, à des moments déterminés, provoquer la vaporisation subite de l'eau qui, soulevée par les bulles de vapeur venant du bas, arrive à leur contact, d'où résulte une explosion.

Le dépôt de silice des geysers provient d'une réaction chimique très simple : les eaux chaudes attaquent les roches poreuses qu'elles traversent et leur enlèvent les silicates de potasse et de soude. Mais les vapeurs par lesquelles se fait l'échauffement de ces eaux contiennent une certaine proportion d'acide chlorhydrique et de gaz sulfureux. Ces acides tendent à s'emparer des alcalis pour les transformer en sulfates et en chlorures. Bientôt la silice des silicates n'est plus assez énergiquement retenue en combinaison et l'excès se dépose au fur et à mesure sous la forme hydratée.

Comme tous les phénomènes que nous avons étudiés, l'action des geysers est loin d'être permanente. A plusieurs années de distance, on remarque une diminution sensible dans son intensité. Les éruptions du Grand Geyser d'Islande n'ont plus la régularité qui les avait rendues classiques, et celles du Yellowstone, observées pour la première fois en 1872, offrent déjà des symptômes de décroissance. Là, comme partout, le temps, loin d'accentuer l'effet des forces naturelles, met

plutôt en évidence cette tendance générale au repos, que nous avons tant de fois signalée.

Geysers calcaires. Travertins. — Si le phénomène physique des geysers est indépendant de la nature du terrain traversé par les émanations, il n'en est pas de même du phénomène chimique. Lorsque la roche encaissante est un calcaire, c'est du carbonate de chaux que les eaux lui enlèvent, à la faveur de l'acide carbonique, et qu'elles vont déposer ensuite à leurs points d'émergence. Ainsi se forment, sur les bords du Yellowstone, de vrais *geysers calcaires*.

Dans la même famille, mais avec une moindre violence des émissions, doivent être rangées ces sources chaudes, en relation évidente avec l'action volcanique, qui, en déposant à l'air, surtout dans les cascades, le calcaire dont elles étaient chargées, donnent naissance à des dépôts concrétionnés de tuf dit *travertin*. Les travertins les plus connus sont ceux de Tivoli, en Italie, ceux des anciens bains d'Hiérapolis, près de Smyrne (fig. 22), enfin les dépôts formés à Clermont-Ferrand par la fontaine incrustante de Saint-Alyre, dernier écho d'une activité volcanique depuis longtemps endormie.

Sources thermominérales. — Après avoir passé des volcans aux solfatares, de celles-ci aux jets de vapeur et de ces derniers aux sources bouillantes, descendons encore d'un degré sous le rapport de l'énergie des émissions. Nous arriverons à une catégorie de dégagements, dont la liaison avec le volcanisme pourrait facilement échapper, si toute une série de types intermédiaires n'établissait une chaîne continue entre les deux ordres de faits. Nous voulons parler des *sources thermales* ou *thermominérales*, qui sortent en divers points, parfois avec une pression notable et une température assez élevée, entraînant en dissolution certains principes actifs, tels que des chlorures et des sulfates. Plusieurs de ces émanations sont d'ailleurs caractérisées par le *rythme* spécial, c'est-à-dire la périodicité, qui préside aux manifestations de leur activité, ce qui les rapproche des solfatares et des volcans.

Toutes ces sources se font jour par des *fentes* bien déterminées de l'écorce et ne se trouvent que dans les régions particulièrement disloquées, où elles forment souvent des groupes

alignés. Si quelques-unes, comme celles de Plombières, sont assez éloignées de tout centre volcanique, même éteint, d'autres, telles que les sources de Vichy, de Royat, du Mont-Dore, de la Bourboule, etc., se relient sans doute possible à l'ancienne activité éruptive du Plateau Central de la France. Enfin il est des cas, comme au *Sulphur Bank* de Californie, où l'on peut s'assurer que les dégagements thermominéraux représentent l'état actuel d'une ancienne solfatare. En ce point, au-dessous d'une coulée de lave en partie décomposée,

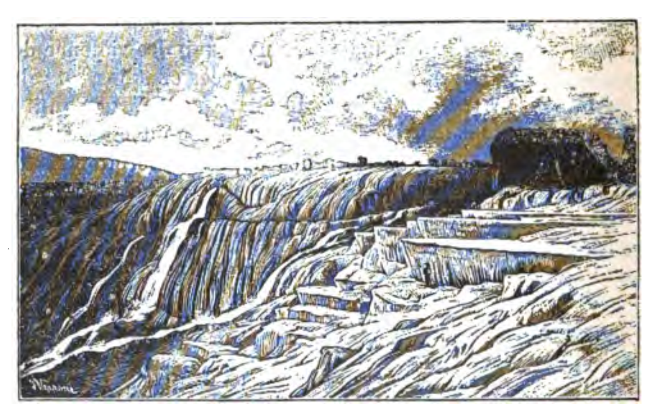


Fig. 22. — Les terrasses calcaires de travertin d'Hiérapolis.

que recouvre une couche de soufre natif, on voit dans les profondeurs les fissures du terrain parcourues par des *eaux chaudes ascendantes*, qui contiennent une forte proportion de *sulfures alcalins*, avec un excès d'acide carbonique et d'hydrogène sulfuré. Ces eaux déposent du *cinabre*, c'est-à-dire du sulfure de mercure, ainsi que de la silice. Une certaine quantité d'*huile minérale* n'y fait jamais défaut.

Ces observations présentent une extrême importance, en permettant de prendre, en quelque sorte, *sur le fait*, la formation des minéraux métalliques sulfurés, au sein d'un milieu *réducteur* (puisque les hydrocarbures s'y rencontrent). On voit que ces minéraux émanent d'un foyer profond, certaine-

ment volcanique dans l'origine, et qu'ils arrivent à la faveur de dissolutions, attaquant leurs canaux d'ascension pour y déposer plus haut, quand la pression et la température sont moindres, avec les sulfures métalliques, les *gangues*, telles que la silice, qui proviennent de la décomposition du terrain traversé.

Salses. Mofettes. — Toutes les émanations dont nous avons parlé jusqu'ici sont chaudes et ne contiennent guère que des substances oxydées. Celles qu'il nous reste à mentionner sont plutôt froides (quoique souvent à une température supérieure à celle du terrain encaissant) et caractérisées par la présence constante des hydrocarbures gazeux ou liquides.

Le type en est fourni par les *salses* ou *volcans de boue*, petites éminences cratériformes, d'où s'échappe, parfois avec projections violentes, une *boue salée*, traversée par des bulles de gaz hydrocarbonés. Certaines salses, comme celles de Bakou, sur la Caspienne, donnent lieu à une abondante récolte de pétrole. D'autres fournissent des jets de gaz susceptibles de s'enflammer à l'air, en formant des *fontaines ardentes* ou *terrains ardents*. La mer Morte paraît être une ancienne salse, où les dégagements d'hydrocarbures se font jour encore à l'état de *bitume*. S'il y a des salses qui se contentent de distiller des matières organiques renfermées dans l'écorce sédimentaire, beaucoup d'autres sont certainement de nature volcanique, comme les volcans de boue qui se sont formés en divers points après l'éruption de 1902 à la Martinique.

D'autres émanations froides, caractéristiques des régions où l'activité volcanique est depuis longtemps éteinte, comme l'Eifel et les bords du Rhin, sont les *Mofettes* ou exhalaisons d'acide carbonique. On en compte plus de mille dans la région rhénane, et, quand le gaz se dégage dans l'eau, il en résulte des sources d'eau gazeuse comme celle de Selters.

On peut penser que les mofettes sont le produit de l'action oxydante de l'air sur des émanations d'hydrocarbures, ce qui les rattacherait étroitement aux salses en faisant, des unes et des autres, le dernier terme de la décroissance des manifestations éruptives.

§ 3

GÉOTHERMIQUE. THÉORIE DES PHÉNOMÈNES ÉRUPTIFS

Définition de la géothermique. — Les actions internes que nous avons étudiées offrent ce caractère commun, qu'elles s'exercent en des points bien déterminés de l'écorce terrestre, Sans doute elles ont toutes pour principe l'énergie calorifique intérieure ; mais rien ne nous autorise encore à faire dériver cette énergie d'un foyer unique et l'on pourrait, à la rigueur, imaginer qu'il existe, dans le globe supposé solide, autant de cavités distinctes, remplies de matières fluides à haute température, qu'il y a de centres d'activité volcanique ou thermale.

Pour déterminer laquelle des deux hypothèses doit être préférée, il importe de rechercher s'il ne se passe pas, dans l'écorce terrestre, quelque phénomène absolument général, propre à démontrer la continuité de la source de chaleur. C'est ce que nous allons vérifier en dirigeant notre attention vers un nouvel ordre de faits, dont l'étude forme, sous le nom de *Géothermique*, un des chapitres les plus intéressants de la science du globe.

Propagation de la chaleur dans le sol. Zone à température invariable. — Nous avons vu plus haut quel ensemble de conditions réglait, en chaque point, la température de l'air au-dessus de la terre ferme. Cette température, que partage la couche superficielle du sol en contact immédiat avec l'atmosphère, varie à tout instant, en raison de la hauteur du soleil et du jeu des saisons. Mais, pour peu qu'on s'enfonce dans le sous-sol, les variations de la chaleur sont lentes à se propager, les roches, meubles ou compactes, ayant en général une très faible conductibilité calorifique. Ainsi, à Paris, l'influence d'un changement survenu dans la température de l'air ne devient sensible qu'au bout de *trente-huit jours* à travers une tranche de sol d'*un mètre* d'épaisseur.

Il suit de là qu'à une certaine profondeur, variable en chaque lieu avec l'amplitude des oscillations annuelles de la colonne thermométrique, il existe une zone où les variations de la

température ne peuvent plus se faire sentir et où, par conséquent, le thermomètre doit demeurer immobile, accusant toujours la *moyenne annuelle de l'air* au lieu correspondant. Cette invariabilité est réalisée à Paris pour une profondeur de 10 mètres, et c'est ainsi que, dans les caves de l'Observatoire, le thermomètre centigrade se tient constamment à 10°,8 au-dessus de zéro, moyenne de la température pour l'atmosphère parisienne depuis le moment où l'on a commencé à l'observer régulièrement. Sous l'équateur, où les saisons sont à peine marquées, la couche de température constante se rencontre à peu près à 1 mètre de profondeur. Mais plus on remonte vers les cercles polaires et plus il faut l'aller chercher loin de la surface.

Augmentation de la chaleur avec la profondeur. Sources géothermales. — S'il n'existait aucune source de chaleur à l'intérieur du globe, la température, à partir de la couche invariable, devrait être constante jusqu'au centre. Il n'en est pas ainsi, et l'expérience des mineurs a depuis longtemps établi que plus on descend, plus la température s'élève, dans des proportions que ni la combustion des lampes, ni la respiration des ouvriers, ni les réactions chimiques admissibles ne sauraient expliquer. Ce résultat est absolument général. Il n'est pas une excavation profonde qui n'en fournisse la démonstration, non seulement près des volcans, mais à des milliers de kilomètres de tout centre éruptif. Le fait se vérifie jusque sous le sol glacé des plaines de la Sibérie, dans les environs d'Iakoutsk, dont la moyenne annuelle est de 10° *au-dessous de zéro*, et où les puits finissent par rencontrer, à 125 mètres de la surface, une zone qui permet l'existence de l'eau à l'état liquide. L'eau des puits artésiens de Paris jaillit, d'une profondeur de 600 mètres, avec une température de 28° centigrades et, pendant le percement du souterrain de Saint-Gothard, le thermomètre, qui marquait 10° aux extrémités, montait au milieu, sous une épaisseur de 1 700 mètres de terrain, à 30°,8, tandis qu'au mont Cenis, sous une verticale de 1 600 mètres, il avait atteint 30°,1.

On remarquera que l'existence de cette chaleur interne doit suffire pour expliquer à elle seule l'apparition de cer-

taines sources chaudes. L'eau qui s'est infiltrée à travers les fentes d'un massif montagneux peut se trouver ainsi conduite dans des régions où elle s'échauffe notablement au-dessus de la température moyenne de la surface. Si alors une autre fente lui ouvre une voie facile vers le dehors, la simple pression hydrostatique l'y ramènera, sans que l'action volcanique y soit pour rien. De telles sources peuvent être appelées *géothermales*.

Degré géothermique. — Le fait de l'augmentation de la chaleur avec la profondeur étant universellement constaté, il reste à voir à quelles règles obéit cet accroissement.

Si l'on appelle *degré géothermique* la distance verticale qu'il faut parcourir pour que le thermomètre monte de 1 degré centigrade, on trouve, à la suite d'un premier examen des résultats fournis par un grand nombre de mines, que la valeur de ce degré varie d'une mine à une autre, et qu'elle oscille depuis un minimum de 16 mètres jusqu'à un maximum de 118 mètres, la moyenne se tenant habituellement entre 42 et 55 mètres. D'autre part, les sondages artésiens, pour des profondeurs atteignant 600 mètres, donnent des résultats à la fois plus faibles et beaucoup plus concordants, presque toujours compris entre 30 et 32 mètres.

De telles différences n'ont rien qui puisse étonner. En effet, le mode de propagation de la chaleur dans l'écorce terrestre doit varier avec la nature et la porosité des roches, avec l'inclinaison des couches et leur état de dislocation, qui permet tantôt la descente des eaux froides de la surface, tantôt l'accès des eaux ou des vapeurs chaudes venant de l'intérieur. Il n'y a donc pas lieu de s'arrêter à ces variations de détail, dont l'importance s'efface absolument devant le résultat des expériences décisives exécutées, avec toutes les précautions convenables, à l'occasion des trois sondages les plus profonds qui aient encore été entrepris. Nous voulons parler du sondage de Sperenberg, près de Berlin, poussé à 1 267 mètres de la surface, de celui de Schladebach, non loin de Leipzig, dont la profondeur a dépassé 1 700 mètres, enfin de celui de Paruschowitz, en Silésie, où la sonde a atteint 2 003 mètres.

Le premier a donné une température au fond de 48°,1;

dans le second, à 1 656 mètres, le thermomètre s'est tenu à 55° centigrades. Au fond du troisième, on a enregistré 69°,3.

Il est donc permis de dire que, aussi loin qu'on soit descendu, *la température ne cesse de croître régulièrement.* En outre, le taux moyen de cet accroissement, lorsqu'on part d'une altitude voisine du niveau de la mer, s'exprime par un degré géothermique compris entre 32 et 37 mètres.

Hypothèse du noyau igné. — Or il ne s'agit plus ici d'un échauffement local, qu'il soit loisible de rapporter à une cause accidentelle. C'est toute l'écorce terrestre qui se montre ainsi le siège d'un *échange incessant et régulier de chaleur entre les couches profondes et les couches extérieures.* Les données expérimentales que nous venons d'enregistrer nous autoriseraient, à la rigueur, à calculer la profondeur pour laquelle la température atteindrait le degré nécessaire à la fusion de toutes les roches, et nous trouverions que cette profondeur n'est vraisemblablement qu'une très petite fraction du rayon terrestre. Mais cela même n'est pas nécessaire. Il nous suffira de constater que l'échange observé nécessite l'existence d'un noyau à température élevée, et que la provision de chaleur de ce noyau doit être telle, qu'elle puisse lutter avec efficacité contre le refroidissement de l'espace, alors que la chaleur solaire, réduite à ses seules forces, ne pourrait entretenir à la surface du globe qu'une température *moyenne* d'une *quinzaine* de degrés. De plus, comme cette source interne, d'après ce que nous savons de l'ancienneté de l'écorce, doit suffire à sa tâche depuis un nombre incalculable de siècles, le bon sens commande de la chercher dans un vaste réservoir de matières à très haute température, que l'écorce solide défend contre le rayonnement, absolument comme la croûte scoriacée d'une coulée de lave lui permet quelquefois de garder sa chaleur pendant des années.

Ce réservoir représenterait le reste de l'énergie calorifique, emmagasinée à l'origine dans la masse brillante de notre planète, alors que, selon la belle conception de Laplace, elle venait de se détacher de la nébuleuse solaire, avec laquelle jusqu'alors elle avait été confondue. On pourrait le considérer comme un bain de matières métalliques, où dominerait le fer,

et qui tiendrait en dissolution des gaz réducteurs, tels que les composés hydrogénés du soufre et du carbone. Ainsi s'expliquerait la forte densité du globe, égale à plus de trois fois le poids spécifique moyen des matières de l'écorce superficielle, et il serait également permis d'y trouver la justification du magnétisme de notre planète. Ajoutons que les météorites, qui sont considérées comme des fragments de matière planétaire, se montrent riches en fer, natif ou combiné au soufre, au phosphore, même au carbone; enfin que les comètes laissent reconnaître au spectroscope la flamme des hydrocarbures, ce qui, par analogie, semble justifier l'hypothèse qui vient d'être exposée relativement à la constitution du noyau.

Explication des phénomènes volcaniques. — Si l'on adopte cette manière de voir, rien n'est plus simple que l'explication qu'on en tire pour les phénomènes volcaniques. On se représente sans peine, sous la croûte solide, la masse ignée, qui peut-être est pratiquement solide à cause de la pression qu'elle supporte, mais qui reste capable de reprendre l'état liquide si la pression vient à diminuer. Dans ce cas, la masse ignée devient le siège de réactions incessantes, et notamment de dégagements gazeux, qui doivent la faire monter à travers les fissures de l'enveloppe et l'amener au jour dans les parties disloquées, lesquelles correspondent aux rides de l'écorce les mieux accentuées, et coïncident pour ce motif avec les rivages maritimes. Ainsi se détachent du réservoir commun, pour cheminer, désormais isolées, dans les sillons intérieurs de la croûte, des colonnes liquides destinées à s'épancher sous la forme de laves, et cela d'autant plus aisément que les fissures demeureront mieux ouvertes. De temps en temps, les gaz emprisonnés dans ces nappes atteignent une tension suffisante pour provoquer de violentes explosions : d'autres fois, au contraire, comme aux îles Sandwich, les matières sont assez fluides pour que les cheminées ne s'obstruent pas, et alors l'ascension de la lave est continue et exempte de phénomènes explosifs.

Nous avons vu en effet que diverses vapeurs, et notamment la vapeur d'eau, sont intimement mélangées à la lave. Il est

naturel que ces fluides tendent à se dégager dans certaines conditions de température, de pression et d'équilibre chimique. Le fait que leur sortie tumultueuse précède toujours l'ascension des laves est significatif, et nous semble justifier cette conclusion, que la cause principale des éruptions est *le départ des gaz incorporés à la masse ignée.*

Celle-ci a commencé de longue date à monter à travers les parties faibles de l'écorce (lesquelles se trouvent généralement à la jonction des masses continentales, bien définies avec les grandes dépressions maritimes). Ainsi se sont créés des réservoirs, en communication lointaine par leur base avec le noyau igné, et dont chacun peut subir, pour son compte, une élaboration distincte de celle qui s'opère dans les autres; ce qui expliquerait à la fois la différence des produits de deux foyers éruptifs distincts, et la variation avec le temps des produits d'un même foyer.

De temps en temps, les gaz emprisonnés dans ces réservoirs atteignent, par suite de la viscosité des laves, une tension suffisante pour provoquer de violentes explosions. D'autres fois, comme aux îles Sandwich, la lave est si parfaitement fluide, qu'elle monte sans peine et sans projections jusqu'à 4 000 mètres de hauteur; et quand elle débouche dans la chaudière du cratère, la sortie rapide mais tranquille des gaz produit de véritables fontaines jaillissantes de feu, qui sont une des merveilles du Mauna Loa.

On a pensé plus d'une fois que l'intervention de la mer était nécessaire pour expliquer les paroxysmes, dont chacun résulterait d'une vaporisation subite des eaux marines, arrivant par quelques fissures au contact de la masse ignée. Mais il semble qu'on puisse aisément se passer de cette hypothèse. Nombre de volcans, parmi les plus actifs, sont éloignés de la mer de plus de *deux cents kilomètres*, et l'on se figure mal les eaux océaniques parcourant une telle distance, à travers des canaux étroits et sinueux, en quantités suffisantes pour provoquer une explosion. Quand, de plus, aux îles Sandwich, on voit la lave bouillante se maintenir constamment à une grande hauteur, dans un massif entièrement volcanique, situé en plein océan et où les preuves abondent d'une facile communi-

cation avec la mer, *sans que jamais il se produise une seule explosion*, il doit paraître évident que l'ascension des laves n'a pas besoin du secours des eaux marines. La provision des gaz dissous dans le réservoir interne suffit à expliquer les violents dégagements de vapeurs qui accompagnent certaines éruptions, d'autant mieux que l'expérience des laboratoires, par exemple celle du *rochage* qui se produit dans la coupellation de l'argent, montre que les gaz retenus par un métal en fusion tendent à se dégager par saccades, au moment où une première croûte est déjà formée.

Réponse à quelques objections. — On a soutenu plus d'une fois, au nom des mathématiques, l'impossibilité de l'existence d'un noyau liquide à l'intérieur de notre planète. Tantôt on s'est fondé sur certaines données astronomiques, dont la valeur serait différente, affirmait-on, si le globe était en majeure partie liquide. Tantôt on a invoqué l'aplatissement terrestre, trop considérable, au dire de quelques-uns, pour l'hypothèse en question. Tous ces calculs sont obligés d'accepter, pour point de départ, des données numériques établies par des expériences de laboratoire et dont il est illégitime d'étendre la signification à une masse telle que notre terre. Parmi ces données, les unes s'appliquent à des liquides parfaits, qui ne peuvent avoir rien de commun avec le mélange de métaux et de gaz dont se composerait le noyau; les autres concernent des solides plus ou moins homogènes et élastiques, auxquels la croûte terrestre n'est en rien comparable. Aussi pensons-nous que ces objections théoriques (dont quelques-unes ont déjà dû être abandonnées par leurs auteurs) ne sauraient être considérées comme décisives.

D'ailleurs, quand même elles le seraient, il suffit, pour les mettre d'accord avec la théorie que nous avons exposée, d'admettre une chose extrêmement vraisemblable : à savoir que la pression imprime aux matières ignées, malgré leur haute température, un état *pratiquement* équivalent à la solidité; état dont elles ne sortent que quand une cause locale fait cesser cette compression.

§ 4

MOUVEMENTS DE L'ÉCORCE TERRESTRE

Conséquences de la chaleur interne. — Si l'écorce terrestre n'est qu'une enveloppe, entourant une masse ignée qui, de temps en temps, s'épanche au dehors, il est impossible que la position de la croûte soit stable. Des affaissements doivent se produire, formant la contre-partie de la sortie des laves. De plus le noyau doit se refroidir et se contracter peu à peu, faisant naître, dans l'écorce devenue trop large, une tendance au *ridement* qui se manifestera, sur certains points, par la formation de bourrelets et de fissures, sur d'autres par des effondrements.

Toutefois, si la structure du globe atteste, comme nous le verrons plus tard, que des mouvements de ce genre se sont souvent répétés à travers les âges, nous ne devons pas nous attendre d'une manière absolue à trouver, parmi les phénomènes actuels, la vérification de ces inductions. En effet, la déperdition de la chaleur interne, au point où elle est aujourd'hui parvenue, marche avec assez de lenteur pour ne produire des effets appréciables qu'au bout d'un temps très long. De plus, la terre ayant 510 millions de kilomètres carrés de surface, un affaissement général de *un millimètre*, totalement insensible par lui-même, suffirait à contre-balancer la sortie de 510 *kilomètres cubes* de laves, quantité comparable à tout ce qui a pu être rejeté par les volcans depuis les temps historiques.

Dès lors il est logique d'admettre que nous traversons une de ces périodes d'équilibre, où l'écorce ne peut être affectée que de mouvements insignifiants. Sous cette réserve, nous allons passer en revue les phénomènes de ce genre qui peuvent s'offrir à l'observation.

Tremblements de terre. — En divers points du globe, la croûte solide se montre plus ou moins fréquemment agitée de frémissements, en général très courts, caractérisés par l'état de trépidation du sol et que, pour ce motif, on nomme *trem-*

blements de terre ou *sismes* (*séismes*). Ces mouvements se traduisent, à la surface, quelquefois par des ondulations, plus souvent par des *secousses*, parfois assez fortes, pour entraîner la ruine des édifices et le crevassement du sol, bien que leur durée puisse ne pas dépasser quelques secondes.

Les plus grandes catastrophes de ce genre que l'histoire de l'Europe ait enregistrées sont celles de 526, où 120 000 personnes au moins périrent sur le littoral méditerranéen, et de 1693, où un tremblement de terre, survenu en Sicile, coûta la vie à 60 000 habitants. Les secousses qui détruisirent Lisbonne en 1753 firent 30 000 victimes. A Casamicciola, dans l'île d'Ischia, le 28 juillet 1883, dix secondes suffirent pour amener la destruction de 1 200 maisons et causer la mort de plus de 2 300 personnes.



Fig. 23. — Les colonnes du temple de Sérapis.

Dislocations du sol causées par les phénomènes volcaniques. — Assez souvent, notamment en Calabre, des crevasses béantes se forment dans le sol à la suite de ces ébranlements; quelquefois aussi, dans les pays affectés par de tels mouvements, une portion de terrain se soulève ou s'abaisse d'une manière durable. C'est ainsi qu'en Italie, près de Pouzzoles, le sol du temple de Sérapis, construit par Marc-Aurèle, a subi, sans doute lors de l'éruption de 1198, un affaissement local, par suite duquel les colonnes se sont trouvées immergées au moins sur 6 m. 50. Pendant plus de 300 ans cette immersion a persisté, peut-être avec quelques oscillations, si bien que les mollusques *lithophages*, ceux qui vivent à la surface de l'eau, en pratiquant des logements dans les roches du rivage, ont pu cribler le fût des colonnes, sur 3 mètres de hauteur, de leurs incisions caractéristiques (fig. 23). Puis le sol s'est relevé et aujourd'hui le pavé du temple est seul baigné par l'eau. Plusieurs faits du même genre, mais toujours localisés,

ont été signalés sur la côte du Chili ainsi que dans l'Inde. Seulement il n'est pas du tout prouvé que les déplacements verticaux alternatifs, comme celui dont les colonnes de Pouzzoles portent la trace, soient le résultat de phénomènes mécaniques brusques. Il est fort possible que des nappes de lave, injectées souterrainement dans les profondeurs du terrain, subissent dans leur volume des variations qui doivent déterminer, tantôt le soulèvement en masse, tantôt l'affaissement du sol qu'elles supportent.

En revanche, des mesures précises, récemment effectuées dans la région d'Agram comme au Japon, tendent à prouver qu'à la suite de certains tremblements de terre, la position géographique et l'altitude des points affectés par le phénomène peuvent subir des modifications permanentes, notablement supérieures aux erreurs d'observation admissibles.

Propagation des secousses. — Divers systèmes ont été imaginés en vue de déterminer le mode de propagation des secousses ou *mouvements sismiques*, et l'on est arrivé à dresser, pour chaque tremblement de terre, des cartes qui rendent sensible aux yeux le développement progressif du phénomène. Le résultat de ces constatations a été de montrer que les tremblements de terre sont des vibrations du sol, déterminés par un ébranlement initial survenu au-dessous de la surface et se propageant comme tous les mouvements vibratoires, c'est-à-dire avec une vitesse influencée par la nature des terrains et leur état de dislocation. En arrivant à la mer, la vibration s'y transmet suivant les lois ordinaires de l'ébranlement des liquides, et une vague immense, dite *vague de translation*, se propage à travers toute la masse océanique. Sa vitesse, variable avec la profondeur d'eau, oscille entre 150 et 300 mètres par seconde dans le Pacifique; tandis que, sur la terre ferme, la vitesse de propagation des vibrations ou *ondes séismiques* peut dépasser 1 000 mètres, les solides transmettant les ébranlements beaucoup mieux que ne font les liquides.

Recherche des causes des tremblements de terre. — Il reste maintenant à déterminer la cause de ces ébranlements. Pour y arriver, nous commencerons par laisser de côté tous ceux qui peuvent s'expliquer par des circonstances purement

locales; par exemple les tremblements de terre produits, dans les pays accidentés, comme la Suisse, par le changement d'assiette de certains massifs de terrain, quand les infiltrations ont délayé ou dissous les couches (argile, sel, gypse, etc.) qui leur servaient de support. Nous négligerons également les désordres occasionnés, dans le voisinage immédiat des volcans, par la violence des éruptions, désordres dont la cause est suffisamment visible.

L'expérience prouve qu'il n'y a pas de liaison nécessaire entre les tremblements de terre importants et les éruptions volcaniques. Nulle part on ne peut mieux le vérifier qu'au Japon, le pays du monde où les secousses sont le plus fréquentes, et qui, de plus, offre de nombreux volcans actifs. Les paroxysmes de ceux-ci sont presque toujours indépendants des sismes; et, parmi ces derniers, ceux qui ont exercé le plus de ravages n'ont coïncidé avec aucune éruption.

En général, les grands tremblements de terre, ceux qui affectent des étendues de pays considérables, se montrent tout à fait indépendants de l'action volcanique, tandis que leur mode de propagation est lié aux accidents principaux du relief, tels que les montagnes et les lignes de dislocation. Aussi a-t-il paru naturel à plus d'un géologue de les considérer comme l'indice de mouvements généraux du sol, déterminés par le défaut d'équilibre de la croûte, de telle sorte qu'il y faudrait voir les phénomènes précurseurs des mouvements *orogéniques*, c'est-à-dire de ceux qui sont destinés à se résoudre dans la formation de chaînes de montagnes.

De fait, on connaît à la Nouvelle-Zélande, ainsi qu'au Japon, des exemples de tremblements de terre ayant fait naître des crevasses de 60 à 150 kilomètres de long, et dont les deux bords présentaient une dénivellation sensible, parfois même un rejet horizontal. La fréquence de ces ébranlements dans la Méditerranée, dont on sait aujourd'hui que les différentes fosses résultent d'effondrements peu anciens, plaide en faveur de la même manière de voir. Ainsi chacun d'eux indiquerait, soit l'ouverture d'une crevasse dans la profondeur, soit un tassement qui ferait glisser un compartiment de l'écorce le long d'une fente.

De telles crevasses ne pourraient d'ailleurs pas se produire sans ouvrir quelquefois une voie facile aux produits volcaniques sous-jacents. Ainsi s'expliqueraient la liaison possible des tremblements de terre avec les éruptions, et le fait que les secousses présentent souvent dans leur allure une grande analogie avec les ébranlements qui caractérisent les explosions des volcans.

Résultats des observations récentes. — Dans ces dernières années, les observations simultanément poursuivies, sur toute la surface terrestre, à l'aide de *sismographes* appropriés, ont révélé des faits extrêmement curieux, dont la synthèse a été faite par M. J. Milne.

Un sisme suffisamment important (il s'en produit annuellement une centaine de ce genre), peut affecter un sismographe situé aux antipodes du point ébranlé, en y faisant naître trois séries de vibrations, dont les deux premières se propagent à travers le globe avec des vitesses respectives de 10 et de 5 kilomètres à la seconde, tandis que la troisième parcourt l'écorce terrestre avec une vitesse moyenne constante de 3 kilomètres. L'étude des deux premières séries permet de reconnaître à quelle distance de l'appareil un sisme de ce genre a pu se produire.

On peut alors s'assurer que tous les grands ébranlements ont leur centre placé ordinairement en pleine mer, au-dessus de fosses maritimes profondes, et que ces centres se groupent par séries, chacune d'elles correspondant à une chute relativement brusque de niveau entre la terre ferme et l'océan. Il n'est donc plus possible de contester que le phénomène sismique ne soit de nature *orogénique*, et qu'il n'apporte la preuve des mouvements différentiels qui s'accomplissent entre les divers compartiments de la *marqueterie* terrestre.

Déplacement des lignes de rivage. — Existe-t-il, en dehors des mouvements brusques dont nous venons de parler, de lentes oscillations de l'écorce? Il est certain que, sur plus d'un point, les rivages maritimes subissent des changements, que ces variations ont un caractère local, qu'elles se produisent sans régularité et que les symptômes d'émersion semblent quelquefois alterner, sur une même côte, avec ceux de submersion. Dès lors, au lieu de faire intervenir des changements

de niveau de la nappe océanique, qui paraîtraient devoir se produire partout dans le même sens, n'est-il pas naturel d'y voir la preuve de mouvements partiels de l'écorce, se traduisant, grâce à l'invariabilité du niveau de l'océan, par des déplacements en sens contraires dans les lignes des rivages?

Ainsi l'on admet assez généralement que le sol des Pays-Bas s'affaisse et qu'en Scandinavie une sorte de mouvement de bascule se produit, par suite duquel le fond du golfe de Bothnie se relève, tandis que la partie méridionale de la Suède tendrait à se laisser envahir par les eaux.

Interprétation des faits observés. — Toutefois la signification des faits observés n'est pas toujours aussi nette qu'on pourrait le croire après un premier examen. Dans les contrées comme la Hollande, que de grands fleuves ont anciennement conquises sur la mer, le tassement naturel du sol pourrait suffire à expliquer l'affaissement qu'on y remarque. Le régime des courants marins peut d'ailleurs changer ainsi que la violence des vagues, pour des causes encore mal connues, et rendre périlleuse la situation de côtes auparavant moins exposées aux assauts de l'océan. De cette manière, l'invasion relativement récente de la mer dans la baie du mont Saint-Michel, par exemple, pourrait se justifier par un progrès constant de la force des grandes marées, sans que le sol se fût réellement affaissé. D'autre part, certaines conquêtes de la terre ferme, comme celles qui ont eu lieu depuis quelques siècles sur le littoral charentais, sont simplement le résultat du progrès des alluvions apportées par les fleuves.

Enfin le niveau de la mer est sujet lui-même à des variations d'une certaine amplitude. Tantôt les glaces polaires, en fondant, diminuent la salure et, par suite, la densité de l'eau marine avoisinante, et celle-ci, pour continuer à faire équilibre aux eaux plus salées des latitudes inférieures, est forcée d'élever son niveau d'une quantité correspondante. Tantôt les glaces continentales, par l'excès de masse qu'elles apportent sur les régions où elles viennent s'accumuler, peuvent augmenter, en vertu des lois de la gravité, l'attraction locale de ces glaces sur les océans voisins, dont elles relèveraient les bords d'une manière appréciable, et dans une proportion qui varie

avec l'épaisseur des neiges et des glaces. Tantôt enfin une mer intérieure, comme la Caspienne, ou une mer en communication difficile avec l'océan, comme la Baltique, reçoit, suivant les années, par les fleuves affluents, un tribut inégal en raison des variations survenues dans le régime des pluies; et de là peuvent résulter des oscillations de niveau qu'on aurait tort d'imputer à un mouvement propre du sol.

Ces considérations exigent qu'on apporte une grande prudence dans l'interprétation des *mouvements relatifs* de la terre et de l'océan. Néanmoins les observations faites en Scandinavie, dans ces dernières années, semblent bien établir que le littoral oriental de cette contrée se relève vers l'axe du pays, et dans une mesure d'autant plus forte qu'on se rapproche davantage de cet axe. A Stockholm, le taux du relèvement serait de 47 centimètres par siècle. De même, le territoire des grands lacs de l'Amérique du Nord paraît se relever dans la direction du nord-est, en basculant autour d'une ligne qui passerait au sud-ouest de ce territoire. De cette façon, une ligne horizontale tirée de Chicago dans la direction du nord-est, et longue de 100 kilomètres, aurait, au bout d'un siècle, son extrémité nord-est plus élevée de huit centimètres que l'autre.

Les faits observés sur ce qu'on appelle la *plaine maritime* de la Belgique ne semblent pas moins significatifs. Sur cette bande littorale, où aucun nom, aucun souvenir archéologique ne se rapporte à l'occupation romaine, on constate l'existence d'un dépôt d'alluvions franchement marines, surmontant une couche de tourbe. Or tandis que, à une certaine distance de sa surface supérieure, cette tourbe renferme des instruments de l'âge de la pierre polie, tout en haut, sous les couches marines, elle contient des poteries et des monnaies gallo-romaines, dont les plus récentes datent de la fin du troisième siècle de notre ère.

Il est donc évident qu'ici une invasion marine a brusquement chassé les hommes d'un territoire qu'ils avaient occupé pendant de longs siècles; et on s'explique ainsi comment il a toujours paru si difficile de déterminer le point d'où César s'était embarqué pour la conquête de la Grande-Bretagne,

puisque le littoral du Pas-de-Calais a entièrement changé à cette occasion.

Vers le septième siècle, la couche d'alluvions marines était devenue assez épaisse, et le rivage était assez stable, pour que la tourbe recommençât à se former par-dessus. L'homme reprit possession du territoire, comme on peut le vérifier par les noms du pays et les traditions. Cependant, cinq cents ans plus tard, il dut fuir encore devant une nouvelle invasion marine, qui jeta deux mètres de sable sur le sol provisoirement reconquis. Il est douteux qu'un simple changement dans le régime des marées ou des courants puisse rendre compte de tels phénomènes, et il paraît plus plausible de les attribuer à un mouvement propre du sol.

Aussi admettrons-nous volontiers que, sous nos yeux, et en divers points, les différents compartiments de l'écorce terrestre subissent des mouvements relatifs. En réalité, partout où il nous est donné d'observer la structure intime de cette écorce, nous la trouvons fissurée et même disloquée, parfois à un degré extraordinaire. Il n'est donc pas surprenant que des phénomènes de *tassement*, tout au moins, se produisent dans cet ensemble hétérogène, et que de tels mouvements, très faibles en apparence, puissent, en s'additionnant pendant une longue suite de siècles, en venir à modifier notablement le relief de l'écorce.

LIVRE DEUXIÈME

GÉOLOGIE PROPREMENT DITE
OU
HISTOIRE ANCIENNE DU GLOBE

CHAPITRE PREMIER

NOTIONS GÉNÉRALES SUR L'ÉCORCE TERRESTRE

---

§ 1

COMPOSITION GÉNÉRALE DE L'ÉCORCE

Exemples de formations stratifiées. — Nous avons déjà mentionné les deux catégories de formations, stratifiées et massives, entre lesquelles se partagent toutes les roches de l'écorce terrestre.

Un très bon exemple de terrains stratifiés, qu'on appelle aussi parfois *neptuniens*, à cause du rôle prépondérant que la mer a joué dans la genèse de cette catégorie, s'observe à l'embouchure de la Seine, au cap de la Hève. La base de la falaise est formée (fig. 24) par quelques mètres de *calcaires marneux* et d'*argiles* bleuâtres, supportant, par l'intermédiaire d'une sorte de *gravier ferrugineux*, une assise de 25 mètres de *sables jaunes* avec taches de rouille. Sur ces sables repose un

lit noir d'une argile imperméable, qui sert de support à une assise de *marne sableuse* verdâtre, fortement aquifère. Enfin toute la partie supérieure de la falaise est occupée par une couche de *craie*, grise en bas, plus blanche en haut, dont la stratification s'accuse par plusieurs cordons horizontaux de silex noirs ou gris. Ainsi sur ce point du globe, comme sur une infinité d'autres, la succession des dépôts sédimentaires atteste, dans le passé, les fréquentes variations du régime de la mer qui a occupé ces parages.

Une coupe non moins instructive est celle des grandes plâ-

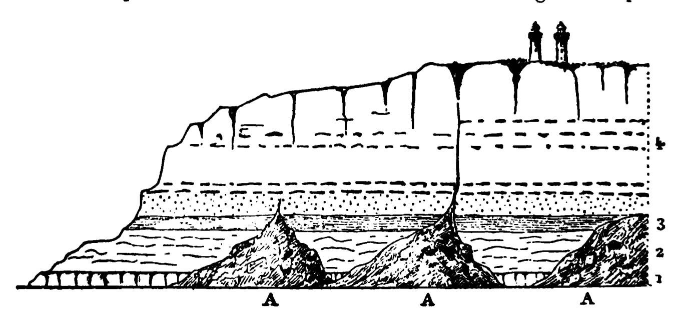


Fig. 24. — Falaise de la Hève. — 1, calcaires marneux; 2, sables; 3, argile; 4, craie à silex; A, éboulis.

trières de la région d'Argenteuil, près Paris. Là, une masse puissante et pourtant bien stratifiée de *gypse* ou pierre à plâtre, avec ossements de mammifères terrestres, est interrompue de temps en temps par des lits horizontaux de marnes jaunes avec fossiles marins, et supporte elle-même des marnes grises, puis blanches, où l'on ne trouve que des espèces d'eau douce. Bientôt les indices marins reparaissent avec une assise de glaises dont la couleur, d'un vert franc, est encore accentuée par son contraste avec un cordon de rognons blancs. Puis viennent des marnes argileuses remplies d'huîtres, et recouvertes par des sables jaunes. Ici donc la mer et la terre ferme ont été tour à tour en lutte et, dans chacune de ces phases, la variation des dépôts indique l'instabilité des conditions physiques.

Exemples de formations massives. — L'allure des formations massives s'observe bien dans le Plateau Central de la France, notamment dans les profondes tranchées par lesquelles la voie ferrée d'Eymoutiers à Meymac traverse le noyau granitique de Millevaches en Limousin. Dans la roche, tantôt compacte, tantôt ameublie et transformée en arène d'un rose vif, on voit miroiter au soleil les paillettes de mica argentin, ainsi que les lamelles cristallines rosées du feldspath orthose et parfois les prismes noirs de tourmaline. Quelques veines, mieux cristallisées que le reste, serpentent à travers la masse et celle-ci est recoupée de temps à autre par des filons presque verticaux d'une roche verte compacte, également cristalline, ainsi que par des veines d'une roche pourrie, que des efflores-

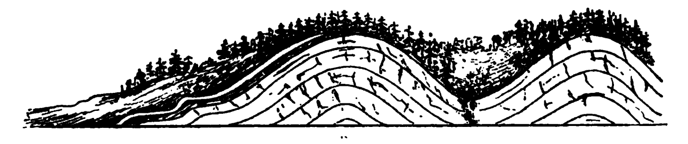


Fig. 25. — Couches plissées dans une cluse du Jura bernois.

cences jaunâtres font reconnaître pour des têtes d'affleurement de filons à minéraux sulfurés.

Rien, dans ce massif aux formes extérieures remarquablement arrondies, ne trahit une stratification quelconque. Mais à peine est-on entré dans le plateau que domine ce noyau de granite, qu'on voit apparaître des schistes régulièrement feuilletés, au milieu desquels des veines de la roche granitique précédente sont injectées en divers points, tranchant par leur couleur claire et rose sur la masse sombre des schistes.

Terrains disloqués. — A côté de ces deux types bien nets, formations sédimentaires en couches horizontales et formations massives à éléments cristallisés, la visite des pays disloqués, comme le Jura (fig. 25), nous en offre un autre, caractérisé par l'inclinaison et le contournement des strates. Là, des couches de calcaires, de marnes, d'argiles, en tout semblables à celles des pays à stratification régulière, se

montrent inclinées, ondulées en de nombreux replis, parfois renversées, fréquemment entrecoupées de cassures.

Il est visible que ce sont là de véritables sédiments, originairement disposés en couches horizontales, mais dérangés plus tard de leur position primitive par les mouvements de l'écorce qui ont donné naissance aux montagnes.

Définition des types de formations. — Ces constatations suffisent pour nous faire reconnaître, dans l'état présent de l'écorce terrestre, le résultat du concours de trois ordres distincts de phénomènes : les *phénomènes sédimentaires*, par le jeu desquels s'est constituée, le long des anciens rivages, sous l'influence combinée de la chaleur solaire et de la pesanteur, une série de couches stratifiées, superposées par rang d'âge; les *phénomènes éruptifs*, dont l'effet a été d'injecter à plusieurs reprises dans l'écorce ou de faire épancher à sa surface des matières fondues, formant par leur consolidation des roches cristallines; enfin les *phénomènes orogéniques* qui, en dérangeant périodiquement l'assiette de la croûte, ont, à diverses reprises, modifié la géographie du globe et ravivé l'activité de la sédimentation.

Pour déterminer lesquels de ces phénomènes sont intervenus dans la formation d'une masse minérale donnée, deux sortes d'observations sont nécessaires : celles qui ont pour objet de définir la nature même de la masse, et celles qui permettent de dire à quel type de structure générale elle obéit. La *lithologie* ou *pétrographie* répond aux premiers de ces besoins; la *stratigraphie* satisfait au second.

§ 2

ROCHES MASSIVES OU ÉRUPTIVES

Nécessité de l'étude préalable des roches éruptives. — Toutes les roches stratifiées étant le produit de la désagrégation de masses minérales préexistantes, les diverses variétés qu'on y observe doivent logiquement être étudiées après les roches de première formation qui leur ont donné naissance. Celles-ci appartenaient, ou bien à la primitive écorce, c'est-

à-dire à la première croûte qui a dû se former à la surface du globe originairement fluide, ou bien aux roches massives qui, à diverses reprises, se sont fait jour à travers les fissures de l'écorce.

D'ailleurs les roches de la croûte primitive, si tant est qu'on les connaisse avec certitude, ne différaient des plus anciennes roches massives que par un arrangement particulier des éléments, trahissant un caractère mixte et sur lequel nous reviendrons plus loin. Telle est la raison pour laquelle ce court aperçu lithologique débutera par les roches éruptives, produits directs de l'activité interne.

Éléments des roches éruptives. — Toutes les *roches éruptives* proviennent de la partie superficielle du noyau igné, dont on peut dire qu'elles ont constitué l'écume. La grande densité moyenne du globe, supérieure à deux fois celle de la moyenne des roches de la terre ferme, et l'intensité des phénomènes magnétiques à sa surface, nous engagent à considérer le noyau interne comme formé par une masse métallique, où le fer domine.

On comprend que l'écume d'un tel noyau doive comprendre les plus légers et en même temps les plus réfractaires parmi les produits de son oxydation. C'est pourquoi, de même que, dans l'affinage de la fonte de fer, on voit flotter, à la surface du bain métallique, des *scories* qui résultent de l'union du fer avec la *silice* ou *acide silicique*; de même aussi que, dans la fabrication de la fonte, la partie supérieure du bain est occupée par des *laitiers*, qui ne sont autres que des combinaisons de *silice* avec la *chaux* employée comme fondant, l'oxyde de fer et divers autres produits; ainsi toutes les roches éruptives sont, en majeure partie, formées de *silicates*. Ce sont des combinaisons de la *silice* ou *acide silicique* avec divers oxydes métalliques. Parmi ceux-ci figurent les oxydes des métaux légers, *aluminium*, *potassium*, *sodium*, *calcium*, lesquels, amenés les premiers à la surface à cause de la faiblesse de leur poids spécifique, ont naturellement dû se brûler à l'air en formant des oxydes, *alumine*, *alcalis* (*potasse et soude*), *chaux*. En outre, le *fer* et le *magnésium*, arrivant d'une profondeur un peu plus grande, sont venus se joindre

(mélange de quartz et de silice fibreuse ou concrétionnée), enfin sous celle d'*opale* (silice gélatineuse), combinée avec de l'eau.

Par le fait, l'élément blanc est toujours plus riche en silice que l'élément foncé. Il en résulte que les roches où il prédomine sont à la fois *claires* et légères, leur poids spécifique oscillant entre 2,6 et 2,7. D'autre part, comme la silice joue dans les combinaisons minérales le rôle d'un acide, on peut aussi les qualifier de *roches acides*. Une roche est franchement acide quand la proportion de silice y dépasse ce qui peut former un feldspath alcalin, c'est-à-dire 68 ou 69 p. 100.

Par opposition aux précédentes, les roches où prévaut l'élément ferro-magnésien sont à la fois *foncées*, *lourdes* et *basiques*. La proportion de silice combinée n'y atteint jamais 50 p. 100; le poids spécifique varie de 2,9 à 3,1. La couleur est d'un vert noirâtre. Tandis que, dans les roches acides, l'oxyde de fer se présente surtout au degré supérieur d'oxydation, en petits points de *fer oligiste*, disséminés au milieu du feldspath auquel ils communiquent une couleur rougeâtre, on voit, dans les roches basiques, de nombreux grains noirs, attirables à l'aimant, de *fer oxydulé magnétique*, parfois même du *fer natif*, et souvent de la *pyrite* ou fer sulfuré.

La transition est absolument continue des roches acides aux roches basiques. Entre les types extrêmes se placent les roches qu'on pourrait appeler *intermédiaires* ou *neutres*, celles où la silice n'est jamais en excès, variant de 50 à 65 p. 100, et où le poids spécifique va de 2,7 à 2,9. Mais cette classe, impossible à délimiter, ne saurait former une famille naturelle.

Origine probable des diverses catégories. Influence de certains éléments. — Longtemps il a paru naturel d'imaginer que les diverses catégories de roches éruptives, selon qu'elles étaient plus ou moins basiques, devaient provenir de zones inégalement profondes appartenant à la périphérie silicatée du noyau igné. En effet les roches basiques, par leur teinte foncée, leur richesse en fer magnétique ou en sulfure de fer, témoignent que l'oxydation directe a eu peu de part à leur formation. Ce serait une raison d'y voir des produits plus voi-

sins que les autres du noyau métallique, où on a tout lieu de penser que les influences *réductrices* sont prédominantes.

Cependant cette conclusion ne saurait être admise dans tous les cas sans réserve. En effet, de même que, dans une roche acide donnée, il se sépare à la fois des minéraux clairs ou acides et des minéraux foncés ou basiques, de même on conçoit que l'élaboration naturelle d'un *magma* silicaté puisse, selon les temps et les circonstances, donner des produits différents. Il s'accomplirait ainsi dans son sein quelque chose d'analogue à la *liquation* qui, dans un mélange de métaux fondus, détermine la séparation successive de plusieurs alliages distincts. C'est ce qu'on nomme la *différenciation des magmas*.

Pour ce motif, il ne faut pas voir dans les diverses roches éruptives des *espèces* vraiment différentes et tranchées, comme sont les minéraux individuels qui les constituent, mais seulement des types variables, et susceptibles d'offrir entre eux toutes les transitions possibles. D'ailleurs, bon nombre de ces roches ont dû subir, postérieurement à leur consolidation, des modifications capables d'en altérer plus ou moins la constitution originelle.

Mais à travers la diversité qui peut résulter de la composition minéralogique, on remarque, chez les roches acides et neutres, une tendance à se grouper en familles naturelles, suivant que l'alcali dominant y est formé par la potasse ou par la soude.

L'expérience montre que quand la proportion de chaux dépasse celle des alcalis, la teneur en silice d'une roche s'abaisse au-dessous de 67 p. 100; elle descend plus bas que 50 p. 100 quand c'est la magnésie qui l'emporte sur la chaux, auquel cas, du même coup, l'alumine et les alcalis tendent vers zéro.

Rôle du silicium et du carbone. — Avant d'aller plus loin, il convient d'arrêter un moment notre attention sur le rôle comparé du silicium et du carbone dans l'écorce terrestre. Ces deux éléments, que les chimistes ont de tout temps classés dans la même famille naturelle et qui, l'un et l'autre, ont la propriété d'affecter trois états distincts, définis par le *charbon*

amorphe, le *graphite* et le *diamant*, sont vraisemblablement mélangés, d'une manière intime, avec le fer qui paraît constituer la masse du noyau interne. Mais dès leur arrivée à la surface, ils se séparent en s'oxydant, et tandis que l'un forme la base de l'écume réfractaire qui va devenir l'écorce solide, caractérisée par sa *stabilité* mécanique et chimique, l'autre sera l'aliment essentiel de la vie, dont il favorisera par sa *mobilité* les perpétuelles transformations. Il est intéressant de voir ces deux rôles opposés remplis par deux corps aussi étroitement alliés l'un à l'autre en raison de l'ensemble de leurs propriétés.

Types de texture. — Une matière fluide de composition donnée engendre des roches très différentes, suivant la manière



Fig. 26. — Texture granitique (du granite égyptien). — Les surfaces couvertes de hachures fines représentent le quartz ; le mica est figuré en noir ; le reste correspond au feldspath.

dont se fait sa solidification et suivant la part plus ou moins grande que les *dissolvants* y peuvent prendre. Tantôt la *cristallisation* est complète, comme dans le granite ; c'est l'état *granitoïde* ; tantôt la plus grande partie de la matière demeure *amorphe* à la façon du verre : c'est l'état *vitreux* des verres naturels ou *obsidiennes* ; tantôt enfin des minéraux nettement cristallisés coexistent avec une pâte amorphe et vitreuse, comme dans les trachytes : c'est l'état *trachytoïde*.

Chacun de ces états est lui-même susceptible de variétés qui se traduisent extérieurement par le *grain* de la roche ou sa *texture*. Ainsi on distingue la texture *granitique* (fig. 26),

où tous les éléments, largement et également cristallisés, se voient sans peine à l'œil nu : la texture *porphyrique* (fig. 27),

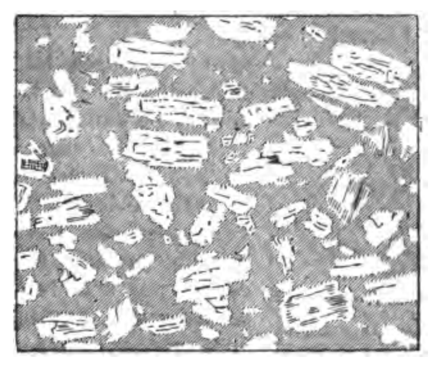


Fig. 27. — Texture porphyrique du porphyre diabasique des Vosges,

où des cristaux bien développés semblent nager, en quelque sorte, au sein d'une *pâte* à grain plus ou moins fin; et la texture *compacte*, caractérisée par l'extrême finesse du grain, qui ne devient discernable qu'avec le secours du microscope.

Signification de la texture. Cristallisation intratellurique. — Le microscope révèle aussi dans les roches porphyriques ou compactes des différences fondamentales, suivant que la pâte, vue sous un grossissement convenable, se résout en individus cristallins distincts (fig. 28), ou bien en petits cristaux mal formés et allongés, dit *microlithes* (fig. 29), ou encore laisse voir une quantité plus ou moins considérable de matière vitreuse, c'est-à-dire non cristallisée.

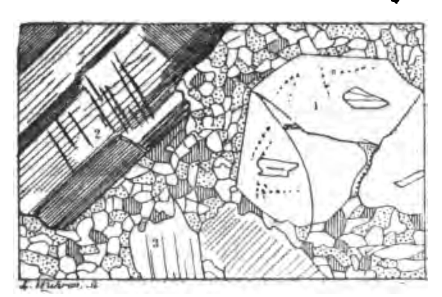


Fig. 28. — Porphyre quartzifère à pâte de microgranulite (granulophyre). — 1, quartz; 2, feldspath oligoclase; 3, mica (grossissement : 80 diamètres).

Or ces différences de texture portent avec elles leur enseignement. Ainsi, dans le *granite*, il est visible qu'il y a eu succession régulière dans la formation des divers éléments minéraux. Le mica s'est séparé le premier. Autour de lui se sont développés les cristaux de feldspath, et enfin la liqueur s'est trouvée ne plus contenir que de la silice, laquelle, sans doute à cause du lent départ des dissolvants qui la maintenaient à l'état liquide, s'est isolée sous forme de quartz. Aussi ce quartz a-t-il dû se mouler, comme une matière plastique, sur les faces déjà formées des précédents cristaux, sans pouvoir prendre les formes cristallines qui lui sont propres. Cette série de cristallisations a été, en général, régulière et ininterrompue. Quelque temps qu'elle ait embrassé, elle n'a pas subi de trouble ni d'arrêt. Enfin, chose remarquable, les lois de la chimie y sont seules intervenues; car, dans le granite, les minéraux les moins fusibles paraissent être précisément ceux qui sont restés le plus longtemps à l'état liquide.

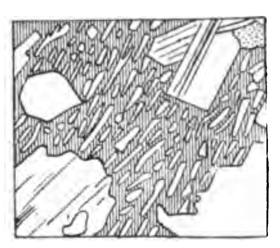


Fig. 29. — Microlithes de feldspath dans la pâte d'une porphyrite.

Or l'expérience des laboratoires indique que de telles conditions n'ont pu être réalisées que dans une masse riche en dissolvants et soumise à une pression énergique, en même temps qu'à un refroidissement très lent; et l'observation géologique est d'accord avec cette conclusion; car elle nous apprend que la plupart des granites *n'ont jamais dû voir le jour*, et représentent des masses injectées dans les crevasses et surtout dans les plis de l'écorce, sans avoir pu parvenir jusqu'à la surface. Ce sont donc, comme l'a défini M. Rosenbusch, des roches de cristallisation *intratellurique*.

Roches à plusieurs stades de consolidation. — Au contraire, dans les porphyres, la pâte se résout souvent, au microscope, en cristaux *de même nature, mais plus petits*, que ceux qui se détachent à l'œil nu sur cette pâte. Il y a donc eu *deux générations* bien distinctes de la même espèce minérale.

Encore la seconde génération est-elle susceptible de deux variétés, l'une où l'on voit des cristaux proprement dits, reconnaissables à la loupe, et l'autre où s'observent des microlithes, c'est-à-dire des individus cristallins imparfaits.

Cette disposition s'explique sans peine, si l'on admet que la masse, après un commencement d'élaboration interne, qui avait donné naissance à de grands cristaux, flottant dans le reste de la matière fluide, ait subi ensuite un refroidissement définitif beaucoup plus brusque, avec départ des dissolvants, lequel, suivant sa rapidité, aura engendré le premier ou le second type de texture porphyrique. Telle est précisément la condition à laquelle ont été assujetties les roches à pâte microlithique; car ce sont des roches d'*épanchement*, qui ont coulé comme des laves. De la sorte, partiellement formées pendant leur ascension dans la cheminée volcanique, elles ont achevé de se consolider en coulant à l'extérieur. Cette dernière phase, beaucoup plus brusque que la première, parce que la perte de température et le départ des gaz ont été presque immédiats, n'a pas permis, en général, le développement de cristaux bien déterminés; parfois même elle a entraîné la prise de la masse à l'état vitreux.

Ainsi les roches de cette catégorie ont traversé deux *stades* ou *temps de consolidation* : un *stade intratellurique*, auquel se rapportent les grands cristaux des porphyres; et un stade *extratellurique*, variable lui-même selon que les épanchements se sont faits à l'air libre ou sous une nappe d'eau.

La combinaison des divers caractères de texture et de composition engendre un grand nombre de roches éruptives, dont les principales seront seules énumérées ici.

§ 3

PRINCIPALES VARIÉTÉS DE ROCHES ÉRUPTIVES

Principe de la classification. — En raison de la continuité de composition qui règne entre les roches les plus acides et les types les plus basiques, la classification la plus pratique est celle qui consiste à mettre en évidence la décroissance progressive de l'élément blanc, depuis les roches où abonde la

silice libre jusqu'à celles où tout élément de ce genre fait défaut. Dans chaque stade, il y aura lieu de classer les types selon que leur texture se rapprochera plus de l'état entièrement cristallin ou de l'état vitreux.

La première classe comprendra les roches le plus franchement acides, c'est-à-dire celles où l'élément blanc est formé par l'association de la silice ou *quartz* avec un *feldspath alcalin* du groupe orthose-albite-oligoclase, ce groupe étant plus riche en silice que tous les autres feldspaths ou feldspathoïdes. La combinaison en question caractérise essentiellement la famille *granitique*.

Famille granitique; Granite, Granulite, Pegmatite. — Parmi les roches du groupe le plus acide, la texture granitique est réalisée au premier chef par le *granite*, assemblage homogène de cristaux bien discernables de quartz, de feldspath et de mica, ce dernier minéral pouvant être remplacé par l'amphibole (granite à amphibole des Vosges et de Syène en Égypte). Dans le granite proprement dit, le quartz forme une sorte de trame ou de squelette (fig. 30) à travers toute la roche; tantôt le feldspath est en petits cristaux lamellaires (*granite commun* de la Corrèze, de la Normandie et de la Bretagne, fournissant les dalles de trottoirs employées à Paris), tantôt il est en gros cristaux allongés, blancs ou roses (*granite porphyroïde* du Plateau Central, de Cherbourg et de Laber-Ildut, près de Brest).

Dans la *granulite* (fig. 31), le quartz est en grains isolés, parfois même en petits cristaux terminés, et au *mica noir* ou brun du granite commun s'y ajoute du *mica* d'un *blanc* d'argent, souvent prépondérant. Une variété de granulite avec le minéral vert appelé *chlorite*, résultant de l'altération du mica, constitue la *protogine* des Alpes.

L'isolement du quartz est surtout remarquable dans la *pegmatite*, variété de granulite à très grands cristaux, où le mica blanc se concentre en piles de paillettes hexagonales; en même temps la fréquence des *druses* ou cavités dans lesquelles les cristaux se sont individualisés, jointe à la présence de minéraux riches en *fluor* et en *acide borique*, comme la *tourmaline*, sous la forme de prismes noirs cannelés, atteste la puissance des dissolvants sous l'empire desquels a dû

s'opérer la consolidation de la masse. Il y a des pegmatites dites *graphiques*, où les cristaux de quartz se détachent en gris, dans les cassures, sur le feldspath blanc ou rose, simulant des caractères hébraïques ou cunéiformes (fig. 32).

Le quartz et le feldspath rayant tous deux le verre, le granite constitue une roche essentiellement dure et d'une grande solidité. Il est susceptible de prendre un beau poli et, dans cet état, la teinte d'un noir verdâtre foncé des lamelles de

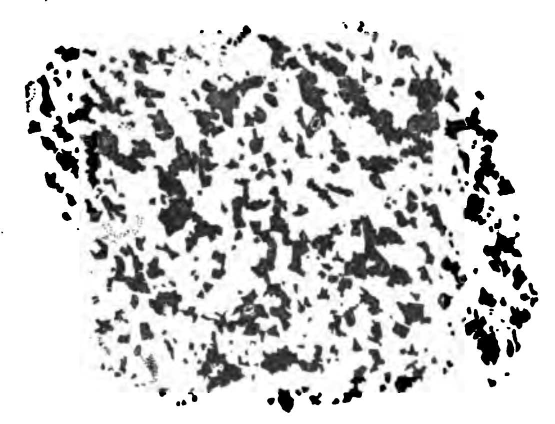


Fig. 30. — Disposition du quartz (parties noires), dans la masse du granite commun.

mica fait un agréable contraste avec la nuance habituellement rougeâtre du feldspath et l'éclat vitreux des grains grisâtres de quartz. Cependant, malgré la résistance du granite, l'action prolongée pendant des siècles des agents atmosphériques le désagrège, en fait de l'*arène* ou sable meuble grossier, et change son feldspath en un silicate hydraté d'alumine, analogue au *kaolin* ou terre à porcelaine.

Le granite, manquant de calcaire et gardant toujours un grain appréciable, est peu propre à la culture des céréales. Le châtaignier y croît de préférence et les prairies s'établissent aisément à sa surface, où les parties plates forment volontiers des tourbières.

Il arrive quelquefois que, sur les bords d'un massif ou dans des filons, le grain d'une roche granitique (sans doute sous

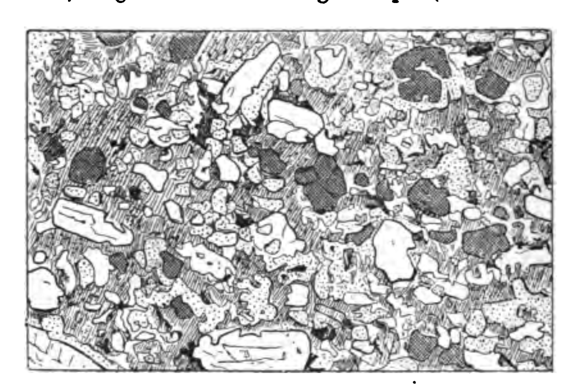


Fig. 31. — Granulite. — Les grains de quartz, indiqués par des hachures croisées, et les cristaux de feldspath sont disséminés au milieu d'une pâte composée de grains cristallins de feldspath dominant.

l'influence d'un refroidissement plus brusque) devienne assez fin pour n'être plus discerné qu'à la loupe. Les roches con-



Fig. 32. — Pegmatite graphique.

nues sous les noms de *microgranite* et d'*aplite* appartiennent à cette catégorie.

Porphyres et roches acides vitreuses. — Les roches acides qui ont traversé deux stades de consolidation affectent la texture porphyrique et engendrent d'abord le grand groupe

des *porphyres quartzifères*. La pâte, dont les éléments, pour être reconnus, demandent le secours de la loupe, souvent même celui du microscope (auquel cas il faut tailler la roche en lames minces et transparentes), forme un fond rouge, brun, gris ou verdâtre, sur lequel se détachent en clair des cristaux nets de feldspath et des grains vitreux de quartz. Les roches de cette nature, toujours dures et souvent susceptibles d'un beau poli, forment de nombreuses variétés, qui se présentent surtout en nappes et en filons, tandis que le granite et la granulite sont plutôt en massifs. Aussi est-il très probable que les porphyres sont une manière d'être externe de pâtes éruptives qui, dans la profondeur, auraient engendré des types granitiques.

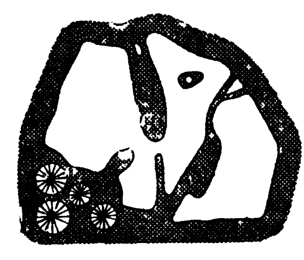


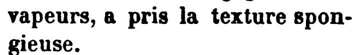
Fig. 33. — Ancien cristal de quartz, brisé et corrodé dans la pâte d'une rhyolite, avec quelques sphérolithes.

En général, la pâte des porphyres est une granulite à grain très fin ou *microgranulite*, ce qui pourrait légitimer pour eux le nom de *granophyres*. Même on pourrait les subdiviser en *granitophyres*, *granulophyres* et *pegmatophyres*, suivant que les produits du second stade de consolidation se résoudraient sous le microscope en *microgranite*, *microgranulite* ou *micropegmatite*.

Quand la pâte est compacte et paraît homogène à l'œil nu, on la qualifie de *pétrosiliceuse*. Mais le microscope distingue, dans ces pâtes compactes, celles où la silice en excès s'isole en globules sphériques rayonnés, et celles où elle demeure confusément disséminée dans la masse en éléments très fins, formant des traînées, ce qui est le cas des vrais *porphyres pétrosiliceux* ou *felsophyres*. Souvent, dans ces derniers, les anciens cristaux de quartz qui se détachent sur la pâte compacte sont brisés et ont leurs bords en partie corrodés, ce qui montre que l'équilibre chimique qui leur avait permis de se développer a été partiellement détruit lors du second temps de consolidation (fig. 33). Fréquemment les menus éléments de la pâte d'un felsophyre sont alignés, attestant que la roche,

avant sa consolidation définitive, a subi un écoulement marqué. Cette *texture fluidale* a fait donner le nom de *rhyolites* à un bon nombre de felsophyres. Le nom de *Liparites* est également appliqué à cette catégorie.

Il faut encore ajouter à cette énumération les *verres acides* ou *pechsteins*, où toute la pâte est vitreuse, les *pyromérides*, roches parsemées de globules sphériques, dits sphérolithes, où des fibres de feldspath sont enchevêtrées avec des séparations de silice libre; enfin la *pierre ponce*, roche acide vitreuse qui, s'étant solidifiée au milieu d'un abondant dégagement de



vapeurs, a pris la texture spongieuse.



Fig. 34. — Microlithes de feldspath entourant de plus gros cristaux dans un trachyte (grossissement 80 diamètres).

Famille syénitique. — Les roches acides contenant peu ou point de quartz libre, mais où le feldspath alcalin continue à prédominer, ont pour type granitoïde la *syénite*, véritable granite sans quartz, où l'amphibole remplace le mica, bien qu'il y ait aussi des *syénites micacées*. Il y a des *syénites sodifères*, riches en alcalis, comme la *Laurvikite* de Norvège, à feldspath chatoyant.

Une structure microgranitique de la syénite micacée engendre la *minette* ou *ortholite*, et la même combinaison de minéraux, avec texture porphyrique, donne l'*orthophyre* ou *trachyte* (fig. 34), ainsi nommé parce que le développement des microlithes d'orthose fait que la cassure de la roche est rude au toucher. La *domite* du Puy-de-Dôme en est une variété. Certaines *obsidiennes*, par leur teneur en silice, se rangent dans ce groupe.

A côté des syénites normales, il faut placer la famille des *syénites éléolitiques*, où, le quartz continuant à faire défaut, un feldspathoïde, éléolite ou leucite, vient s'associer au feldspath alcalin dominant. Ces roches sont remarquables par le grand nombre de silicates des métaux rares, zirconium,

cerium, thorium, etc., qu'elles renferment. La texture microlithique est réalisée dans cette famille par les *phonolites*, dont quelques-unes se débitent en plaques sonores, utilisées au Mont-Dore pour les toitures.

Monzonites, Dacites, etc. — Dans toutes les roches jusqu'ici énumérées, l'élément feldspathique dominant était de nature alcaline. Le passage aux roches basiques, où il n'en sera plus de même, s'opère par des types intermédiaires, les uns où le feldspath alcalin est associé à un feldspath sodicocalcique, généralement de l'oligoclase, les autres où l'abaissement de la teneur en silice, résultant de l'existence du seul feldspath sodico-calcique, est compensé par une certaine proportion de quartz libre.

Au premier type appartient la *monzonite*, syénite franchement granitoïde à orthose, oligoclase, amphibole et pyroxène, tandis que l'état granitoïde du second type est réalisé par la *diorite quartzifère*, association d'oligoclase et d'amphibole avec quartz.

La même composition, avec texture microgranitique, engendre la *tonalite* et le *kersanton*, roche foncée, très résistante, utilisée en Bretagne pour la sculpture, tandis que la *dacite* (connue dans l'Esterel) est l'équivalent porphyrique du même groupe.

Roches basiques. Diorites. — Nous arrivons maintenant aux roches basiques, dont les moins pauvres en silice forment la famille des *diorites*, où domine le feldspath sodicocalcique le moins basique, oligoclase ou néphéline, l'élément foncé étant plus souvent de l'amphibole que de l'augite.

La *diorite* est le type granitoïde de la famille, offrant un aspect agréable à l'œil par le contraste de la blancheur des gros cristaux de feldspath avec le vert foncé de l'amphibole. La texture microgranitique est réalisée par les *Kersantites* (*Lamprophyres*) et les *Porphyrites micacées*, tandis que les types franchement porphyriques sont les *andésites* (où se range la lave de Volvic) et les *porphyrites* proprement dites, à microlithes d'andésine, identiques d'ailleurs avec les andésites. Le nom de ces roches dérive de leur grand développement dans la chaîne des Andes. Le *porphyre rouge antique* est de cette classe.

Enfin quand la roche, exclusivement composée de microlithes, prend une cassure compacte, elle forme les roches noires, d'aspect basaltique, connues sous les noms de *trapp*, de *dioritine*, etc.

Gabbros. — Avec la famille des gabbros commence réellement la série des roches basiques. Même dans les types granitoïdes, l'élément blanc cesse d'apparaître franchement, et la roche prend une teinte verte, qui a motivé autrefois la création du mot *grünoten* (*greenstone*). Le feldspath est calco-sodique, c'est-à-dire que la chaux y prédomine sur la soude; c'est le plus souvent du labrador. Le *pyroxène* (*augite* ou *diallage*), l'*hypersthène*, l'*enstatite*, parfois même le *péridot-olivine*, forment l'élément ferro-magnésien.

Les types granitoïdes de cette famille sont le *gabbro* ou *euphotide* (à labrador et diallage), la *norite* (à enstatite), la *diabase* (à augite) et l'*hypérite*. La *dolérite* est une diabase microgranitique et, dans l'*ophite*, abondante aux Pyrénées, le développement des minéraux est intermédiaire entre l'état de microlithes et celui de cristaux (texture *ophitique*). Quand la texture est franchement porphyrique, on a les *lamprophyres basiques* ou *porphyres labradoriques*, dont le *porphyre vert antique* est le type. Le développement de sphérolithes engendre la *variolite*. Enfin l'apparition de l'élément vitreux, dans une pâte de microlithes, fait naître les roches compactes connues sous les noms de *mélaphyre* et de *basalte*, ce dernier riche en péridot olivine et en fer magnétique.

Le basalte est une roche d'épanchement, qui a coulé en grandes nappes régulières. Lorsque la roche a pris l'état solide, le retrait y a souvent fait naître des fentes qui ont découpé la masse en prismes habituellement à six pans (fig. 35). Ces prismes, isolés et mis en évidence par les érosions, forment les *orgues géologiques* du Puy et du Cantal, les *chaussées des géants* de divers pays, les *colonnades* de la grotte de Staffa, etc.

Le *tachylyte* est un verre basaltique.

Théralites. Roches ultrabasiques. — Dans la famille des gabbros, il n'y avait qu'un feldspath calco-sodique. L'association, parfois même la substitution complète, à ce dernier,

d'un feldspathoïde, néphéline ou leucite, caractérise la famille des *théralites*, dont la forme granitoïde est la *Teschénite*, les formes microgranitiques étant la *Shonkinite* et l'*Essexite*. Les types où intervient l'élément vitreux sont les *Téphrites*, *Leucotéphrites* (laves du Vésuve à leucite) et *Leucitophyres* (laves de l'Eifel), qui toutes trois renferment encore, avec l'augite et la leucite, un feldspath plagioclase; enfin, formant le pendant des basaltes, les *Leucitites* et *Néphélinites*, où il n'y a plus en fait d'élément blanc que des feldspathoïdes.



Fig. 35. — Colonnade basaltique.

Enfin la famille des roches ultra-basiques, où domine le péridot, et où il n'y a plus ni feldspath ni feldspathoïde, comprend, en fait de types granitoïdes, les *Péridotites*, les *Pyroxénites* et la *Lherzolite* des Pyrénées, roche largement cristalline composée de bronzite, d'olivine, de diopside chromifère et de spinelle noir. A ces roches correspond, dans la série vitreuse, la *Limburgite*, véritable basalte uniquement composé d'augite, de péridot et de magnétite.

Aux roches ultrabasiques se rattachent étroitement les *serpentines*, formées d'un minéral tendre, silicate de magnésie hydraté, qui résulte de l'altération de masses originairement riches en péridot. Du reste, dans toutes les roches où il existe du péridot-olivine, ce minéral est dans un état plus ou moins avancé de serpentinisation.

Parmi les roches ultra-basiques, il est convenable, au moins en théorie, de réserver une place au *fer natif*. Ce minéral, qui abonde dans certaines météorites, se montre aussi en grenailles dans quelques roches, par exemple dans certains basaltes comme celui du Groenland.

Tufs. — Beaucoup de roches éruptives ont donné naissance, soit par projection, soit autrement, à des *tufs*, semblables à ceux des volcans actuels. Le cas est fréquent pour les *porphyrites*, dont les tufs s'enchevêtrent, en quelque sorte, avec les sédiments terrestres ou marins du même âge. Souvent aussi les coulées de porphyre quartzifère sont accompagnées de tufs, tantôt solides, tantôt argileux et bréchiformes, comme les *argilolites* du val d'Ajol dans les Vosges. Des tufs plus récents, subordonnés aux épanchements d'andésite et de basalte, s'observent dans le massif du Cantal.

Les tufs abondent en Sicile et en Islande, où on les désigne sous le nom de tufs *palagonitiques*, à cause de la *palagonite*, silicate fusible d'alumine, de fer et de diverses autres bases, qui en est l'élément principal. Les *cinérites*, ou cendres agglomérées, produites soit par des coulées boueuses, soit par la chute des cendres dans l'eau, rentrent dans cette catégorie. Quelques-unes ont une telle finesse de grain que les détails les plus délicats des empreintes végétales se sont conservés.

Au nombre des tufs doivent figurer les *brèches* volcaniques ou conglomérats, tels que les conglomérats trachytiques du Mont-Dore. Les blocs et les fragments y sont de toutes tailles et entremêlés de cendres, et leurs cavités sont tapissées de silicates cristallisés, comme ceux qu'on observe au Vésuve dans les amas chaotiques rejetés par de violentes explosions.

§ 4

ROCHES SÉDIMENTAIRES

Principales variétés de sédiments détritiques. — L'étude des phénomènes actuels nous a montré que, parmi les formations sédimentaires, il y avait lieu de distinguer les dépôts *détritiques* (appelés aussi *clastiques* ou fragmentaires), provenant de la destruction mécanique de roches préexistantes, et

les dépôts d'origine *chimique* ou d'origine *organique*. Commençons par les premiers et voyons entre quelles classes ils doivent se répartir d'après les conditions nécessaires de leur formation.

Ces dépôts résultent de la destruction, par les eaux courantes et les vagues, des roches de la terre ferme. Si ces roches sont des sédiments, leur destruction ne fait qu'infliger un nouveau remaniement aux éléments détritiques qui les composaient. C'est donc vers les roches d'origine interne ou éruptives qu'il faut nous tourner pour comprendre ce que peuvent devenir, sous l'attaque des eaux courantes, les minéraux dont elles sont constituées.

La trituration divise le quartz en fragments, auxquels l'eau agitée fait subir une préparation mécanique, qui les assortit par ordre de grosseur. Ainsi naissent des *sables* plus ou moins grossiers, à grains roulés; les plus menues esquilles quartzeuses, capables de demeurer en suspension dans les eaux agitées, se déposent plus loin du rivage, en sables fins à grains anguleux très exactement calibrés. Les feldspaths donnent d'abord, sous le choc, des fragments cristallins lamellaires, qui, s'ils se déposaient immédiatement, pêle-mêle avec le quartz, engendreraient un *gravier* cristallin, destiné, en se consolidant par un ciment, à devenir une *arkose*. Mais une plus longue exposition à l'air humide fait perdre au feldspath ses alcalis et le transforme en une bouillie *argileuse*. Quant au mica, ses paillettes, à peine altérées, se retrouvent, suivant les cas, associées au sable quartzeux ou à l'argile, plus fréquemment à cette dernière; car leur grande légèreté leur permet de flotter jusque dans les eaux qui tiennent en suspension des particules de vase.

Parmi les silicates autres que le feldspath, ceux qui renferment de l'alumine subissent la même transformation en argile. Les autres, silicates de chaux, de magnésie, de fer, disparaissent à la longue, transformés en carbonates, qui deviendront la source de la plupart des dépôts chimiques.

De la sorte, il n'y a que deux grandes classes de formations détritiques : les dépôts *arénacés*, c'est-à-dire de la nature des sables, et les dépôts *argileux*.

Sédiments arénacés. — Les sédiments *arénacés* peuvent être *meubles*, comme les *sables*, *graviers* et *galets*. Ils peuvent aussi être agglomérés, s'il s'est développé, postérieurement à leur dépôt, dans les interstices de leurs éléments, par suite d'une longue circulation d'eaux minérales, un *ciment* siliceux, calcaire ou ferrugineux. Dans ce cas, les sables et les graviers deviennent des *grès*, parfois des *quartzites* (quand le ciment siliceux a agi avec assez d'énergie pour faire disparaître les contours des grains de quartz et donner à l'ensemble l'apparence d'une texture uniforme). Par la même action, les dépôts de galets se changent en *poudingues*, ceux de cailloux anguleux en *brèches*, les deux variétés pouvant être rangées d'ailleurs sous la commune dénomination de *conglomérats*. On donne le nom d'*arkoses* à des grès grossiers fortement cimentés, mais où les éléments, qui souvent sont ceux mêmes du granite, à peine modifiés, sont restés bien reconnaissables. Dans les *grès micacés*, les paillettes de mica se concentrent d'habitude sur les plans de stratification. Il en résulte des grès fissiles, dits *psammites*, qui se cassent de préférence suivant lès surfaces micacées.

Sédiments argileux. Schistes, marnes. — Les sédiments argileux, sous leur forme usuelle, donnent les *argiles* proprement dites, constituées par des grains impalpables de silicates hydratés d'alumine. Ce sont de véritables *vases*, à peu près inattaquables par les acides, happant à la langue à cause de leur avidité pour l'eau, et où la dessiccation fait naître de nombreuses fentes de retrait.

Les argiles sont tantôt massives, tantôt divisées en lits minces ou *feuilletées*. Celles des terrains les plus anciens ont été, en général, durcies par l'action de la chaleur et des infiltrations siliceuses. Elles se distinguent par la facilité avec laquelle on les partage par le choc en feuillets parallèles. A cet état les argiles se nomment *schistes* ou *phyllades*. Les phyllades durs en lits très minces fournissent les *ardoises*. Quelquefois la fissilité des schistes résulte des conditions mêmes de leur dépôt et des variations correspondantes du grain ; mais souvent aussi les plans de *clivage*, c'est-à-dire ceux suivant lesquels se débitent les ardoises, sont obliques sur la véritable

stratification, et l'expérience montre qu'ils ont été produits par une compression énergique, qui a poussé les phyllades suivant une direction différente du plan des couches.

Les schistes charbonneux tachant les doigts sont connus sous le nom d'*ampélites*.

Le mélange de l'argile avec du calcaire donne des *marnes*, faisant avec les acides une effervescence plus ou moins marquée, et qui peuvent être massives, noduleuses, schisteuses ou gréseuses.

Dépôts chimiques. — Nous avons dit qu'un certain nombre de silicates, soumis à une trituration trop prolongée, ne peuvent pas donner de débris solides. Sous l'action de l'air humide, surtout avec le concours de l'acide carbonique, ils se transforment en carbonates. Mais plusieurs de ces derniers ne sont solubles qu'à la faveur d'un excès d'acide carbonique. Quand ce dernier s'évapore, les carbonates se précipitent. Ainsi peuvent se former des tufs *calcaires* dits *travertins*, où le carbonate de chaux peut être plus ou moins mélangé de magnésie, ce qui produit des *dolomies*. Le fer, entraîné d'abord à l'état de sels solubles de protoxyde, peut s'oxyder à l'air et se déposer à l'état de peroxyde hydraté ou *limonite*, ou bien se précipiter de suite sous forme de *carbonate* ferreux ou *fer carbonaté*.

La silice des silicates altérés peut aussi s'isoler et donner lieu à des infiltrations siliceuses, qui engendreront des *meulières*, soit compactes, soit cariées, tantôt par simple précipitation de la silice, tantôt par substitution de cette dernière à d'anciennes masses calcaires. Enfin l'évaporation des eaux, marines ou continentales, fait naître des dépôts de *sel* et d'autres de *gypse* ou sulfate de chaux hydraté, généralement grenu, quelquefois même comme du sucre (gypse saccharoïde), ou bien cristallisé en lamelles; d'autres fois, c'est à l'état anhydre, en *anhydrite*, que se dépose le sulfate de chaux. Ajoutons que la transformation sur place de massifs contenant des silicates d'alumine peut isoler ceux-ci en amas hydratés et très purs, qui donneront des *argiles réfractaires*.

Dépôts organiques; calcaires. — Une grande partie des substances que les eaux courantes ont réussi à dissoudre

échappe à la fixation directe par voie chimique, et vient se répandre dans les eaux de la mer ou celles des lacs. Elle suscite alors l'activité organique, qui devient un mode puissant de fixation des substances en excès. De là résultent des dépôts *organiques*. Les plus importants sont les *calcaires*, caractérisés par leur faible dureté (le carbonate de chaux cristallisé se raye facilement au canif) et par l'effervescence qu'ils font avec les acides, l'acide carbonique se dégageant alors sous la forme gazeuse. On y distingue :

Les *marbres*, dans lesquels le calcaire, en grains ou en lamelles, est cristallisé, tantôt pur (marbres saccharoïdes de Paros et de Carrare), tantôt micacé (cipolins), tantôt souillé de matières diverses (marbres communs noirs, gris, etc.), ou mélangé de noyaux argileux verts ou rouges (marbre griotte, marbre de Campan); les calcaires compacts, à cassure fine et *lithographique*; les calcaires *oolithiques*, en grains concrétionnés, à enveloppes concentriques, dont nous avons déjà parlé à propos des récifs coralliens et qui, avec une finesse de grain très variable, fournissent en France (Lorraine, Berry, Poitou) de très belles pierres de construction; les calcaires à *entroques*, formés d'une accumulation de débris de tiges et d'articles de crinoïdes ou de radioles d'oursins; les calcaires à *polypiers*; les *lumachelles*, constituées par une agglomération de coquilles d'huîtres à reflets nacrés; les calcaires *grossiers*, où le carbonate de chaux est mélangé de matières diverses, souvent de grains de quartz ou de granules de *glauconie* (hydrosilicate de fer et de potasse); les calcaires à *foraminifères*, notamment à *nummulites*, à *miliolites*, à *alvéolines*, pétris d'enveloppes calcaires des petits êtres correspondants; les calcaires *siliceux*, les calcaires *marneux*, c'est-à-dire mélangés d'argile, et fournissant la chaux hydraulique et les ciments; enfin la *craie* blanche, traçante, où des enveloppes de globigérines et d'algues microscopiques sont associées à des grains amorphes de carbonate de chaux.

A cette énumération on peut ajouter certaines marnes lacustres, presque entièrement formées par des carapaces de petits crustacés d'eau douce.

Tripolis, combustibles. — Les *tripolis* ou *farines siliceuses*,

remarquables par la finesse de leur grain, sont constitués par des myriades de frustules de diatomées ou algues élémentaires. La composition de ces frustules est celle de la silice hydratée ou opale commune.

Les *combustibles minéraux* comprennent la *tourbe*, le *lignite*, la *houille* ou *charbon de terre*, plus riche en carbone, et l'*anthracite*, dernier terme de la transformation de la matière végétale. Il y faut ajouter le *bitume* et l'*asphalte*, combinaison de carbone, d'hydrogène et d'oxygène, produite par l'oxydation plus ou moins avancée des huiles minérales.

La houille, même la plus compacte, conserve encore des traces d'organisation qu'on peut mettre en évidence, soit au microscope, soit à l'aide de réactifs chimiques. Elle se montre formée de fragments végétaux, feuilles, écorces et tiges, comprimés et parvenus à divers degrés d'altération. Ceux qui ont le mieux résisté proviennent de *cuticules*, c'est-à-dire de couches épidermiques; on retrouve souvent les cuticules presque intactes dans certains lits de combustibles, notamment en Russie.

Dépôts concrétionnés. — La plupart des dépôts chimiques et organiques, s'étant formés au milieu d'eaux tranquilles, participent, à un degré plus ou moins marqué, de la disposition des terrains sédimentaires. Du reste, il y a peu de sédiments qui, sous leur forme actuelle, n'aient aussi quelques droits à figurer parmi les formations chimiques; car ce sont des phénomènes d'ordre chimique qui ont transformé en roches solides des dépôts originairement meubles. De plus, beaucoup de sédiments se sont modifiés d'eux-mêmes, dans le cours des âges, par suite de la concentration progressive de certains éléments autour de centres particuliers d'attraction, formés soit par des particules minérales, soit par des corps organisés en décomposition. L'expérience nous enseigne qu'une masse pâteuse hétérogène, quand on cesse de la pétrir, ne tarde pas à perdre l'uniformité de sa composition, et que les substances de même nature tendent à s'y grouper en concrétions noduleuses. C'est ainsi que, dans les calcaires où, à l'origine, le carbonate de chaux était intimement mélangé de particules siliceuses, celles-ci se sont peu à peu

séparées en donnant naissance aux rognons de *silex* ou pierre à fusil, particulièrement abondants au milieu de la craie. D'autres fois, c'est de la silice hydratée qui s'est isolée dans une marne, produisant les concrétions connues aux environs de Paris sous le nom de *ménilite* (fig. 36). Dans de nombreuses argiles calcarifères, l'élément calcaire s'est concentré en nodules, dont la surface s'est plus rapidement consolidée que l'intérieur. Aussi les progrès de la dessiccation de ces nodules ont-ils amené la formation de fentes et d'espaces creux, qui plus tard se sont tapissés de cristaux divers. On donne à ces rognons cloisonnés le nom de *septaria*.

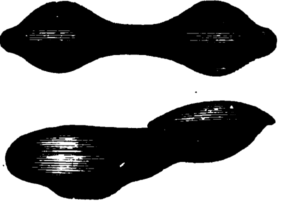


Fig. 36. — Rognons de ménilite.

Fossiles. — Les considérations qui précèdent nous amènent à parler des *fossiles*, c'est-à-dire des restes animaux ou végétaux qu'on trouve au milieu des dépôts sédimentaires, dans la substance desquels ils se sont le plus souvent transformés. Ce sont les débris des êtres contemporains du dépôt des couches et tombés ou demeurés sur le fond après la mort des individus. Quand la chute et l'enfouissement ont eu lieu au sein d'une vase imperméable, non seulement la substance des coquilles, mais la couleur et certaines parties de la matière organisée, ont pu se conserver sans qu'il y ait eu d'autre altération que l'aplatissement causé par la pression des couches supérieures. Mais le plus souvent la roche encaissante a laissé circuler des infiltrations. Tantôt celles-ci ont dissous les coquilles, laissant à leur place un vide dans lequel on peut, avec de la cire, prendre l'*empreinte* du test disparu. Tantôt le vide intérieur s'est rempli d'une matière compacte qui en a pris le *moule* interne; tantôt enfin les infiltrations ont transformé la substance même de la coquille en calcaire cristallin, en silice, en oxyde de fer, en phosphate de chaux, etc. Cette transformation a pu affecter des produits autres que les coquilles ou les ossements; par exemple, il y a des nodules de phosphate de chaux qui ne sont autre chose que le résultat

de la fossilisation de *coprolithes* ou excréments de vertébrés.

Assez souvent les traces de pas des vertébrés ont pu se conserver, l'*empreinte* laissée dans une couche d'argile par les pieds des animaux ayant été remplie, avant d'être oblitérée, par du sable qui s'y est consolidé ultérieurement. La même chose est arrivée plus d'une fois pour des trous de vers dans la vase, pour des traces de clapotement des vagues sur une plage et même pour les marques produites par des gouttes de pluie sur la surface d'un terrain sans consistance.

Roches métamorphiques. — Les dépôts sédimentaires, lorsqu'ils sont traversés ou recouverts par des roches éruptives, se montrent souvent modifiés dans leur composition ou leur structure. Quand cette modification n'est due qu'à la chaleur de la roche injectée, elle ne se manifeste que sur une zone très limitée, ce qu'on pouvait prévoir d'après la faiblesse de l'action calorifique exercée à distance par les laves modernes. Sur quelques centimètres, les grès se fendillent et les calcaires durcissent, tandis que les argiles non réfractaires subissent une fusion partielle, qui les transforme en *porcelanites* ou *thermantides*.

Il en est autrement lorsqu'il s'agit de roches porphyriques et surtout granitiques, à la formation desquelles on peut admettre que les dissolvants ou, tout au moins, les eaux et les vapeurs chaudes sous pression, ont pris une part notable. Dans ce cas, la modification, connue sous le nom de *métamorphisme*, se fait sentir à plusieurs centaines de mètres du contact. Ainsi, au voisinage du granite et de la granulite, les schistes deviennent d'abord gaufrés, puis noduleux, par suite d'un mouvement moléculaire qui concentre en certains points, en la durcissant, la matière colorante charbonneuse de la roche. Plus près du contact, les nodules s'individualisent en petits cristaux prismatiques de *macle* ou *chiastolite*, silicate d'alumine à peu près pur, résultant de la cristallisation du silicate alumineux des schistes, qui deviennent ainsi *maclifères*. Enfin, au contact même, de nombreuses paillettes de mica noir se développent dans la roche, où pénètrent en même temps de très fines veinules de matière granitique. Tout massif de granite, injecté à travers des schistes, possède

ainsi son *auréole métamorphique*, parfois large de 700 à 800 mètres.

Avec les calcaires, le métamorphisme produit sous l'influence des granites se traduit par une sorte de mélange du carbonate de chaux et des silicates granitiques. De là résultent de nouveaux minéraux, silicates d'alumine, de chaux et de fer, parfois de magnésie, dont les *grenats*, dits *grossulaire* et *mélanite*, sont les plus fréquents.

Les roches schisteuses qui ont été exposées, lors de la formation des montagnes, à des compressions énergiques, manifestent un métamorphisme du même genre. Il semble que, sous l'influence de la chaleur développée, l'humidité des roches ait dû suffire pour provoquer une cristallisation partielle. Dans les mêmes conditions, les calcaires peuvent devenir des marbres très cristallins.

§ 5

PRINCIPES DE LA STRATIGRAPHIE

Notion de l'âge relatif. — Il ne suffit pas au géologue d'avoir défini la nature d'une formation, sédimentaire ou éruptive, et sa tâche n'est nullement achevée quand il a reconnu, par exemple, que tel dépôt doit être rangé parmi les calcaires oolithiques ou que tel massif d'épanchement appartient à la catégorie des granites. Il faut encore préciser l'âge de ces formations, non pas l'âge absolu, évalué en nombre d'années, ce qui n'est pas possible dans l'état actuel de la science, mais l'*âge relatif*, c'est-à-dire le rang occupé par la roche massive ou le sédiment dans la série générale des terrains dont se compose l'écorce terrestre. Cette détermination, qui fait l'objet de la *stratigraphie*, repose sur un ensemble de règles qu'il convient d'énumérer ici.

Dépôts sédimentaires. Principe de superposition. — Pour les dépôts sédimentaires (à supposer qu'il s'agisse de terrains qui n'ont pas subi de renversements), la *superposition* fournit un *criterium* certain de l'âge relatif. Tout sédiment est plus jeune que ceux qu'il recouvre et qui formaient le fond sur

lequel il s'est déposé. Si donc, en un point donné du globe, on pouvait percer un puits vertical jusqu'à la croûte primitive et noter la succession des dépôts traversés, on connaîtrait, par cela même, toute la série des événements qui ont influencé, en ce point, la marche de la sédimentation. On verrait les grès céder la place aux argiles et celles-ci aux calcaires, ou réciproquement; on s'assurerait, par le genre des coquilles enfouies, que le dépôt s'était accompli tantôt sur un rivage, tantôt sous la haute mer, et parfois on constaterait que le régime marin avait, momentanément ou pour toujours, fait place à des formations d'estuaire, d'eau douce ou même continentales.

Lacunes. — Mais si l'on peut ainsi, en profitant des carrières, des tranchées de chemins de fer, des travaux de mines et des sondages profonds, dresser une énumération très exacte des phénomènes sédimentaires successifs, on ne saurait cependant se flatter d'en obtenir partout la série complète. Plus d'une fois, en effet, le jeu de l'érosion a pu faire disparaître, en un point donné, entre deux périodes de dépôt, une certaine épaisseur de sédiments, de telle sorte que la succession offrira des *lacunes*. De plus, il s'est produit peut-être des émersions plus ou moins prolongées, pendant lesquelles la sédimentation, même d'eau douce, a été interrompue. Encore à supposer qu'aucune émersion n'ait eu lieu, comme nous savons qu'il est des cas où le fond de la mer ne reçoit pas de dépôts, il peut se faire que sans qu'un seul sédiment ait disparu, il y ait du moins une ou plusieurs lacunes dans la *représentation sédimentaire* de la série des événements, dont quelques-uns, très importants par leur influence sur les contrées voisines, n'auraient dans ce cas, au point considéré, rien qui leur correspondît.

Ce n'est donc pas à l'aide d'observations faites le long d'une seule verticale qu'on doit essayer de reconstituer l'histoire ancienne du globe. Il faut relever le plus grand nombre possible de ces séries verticales et les comparer entre elles, pour reconnaître la place qu'occupe chaque terme dans l'histoire de l'ensemble.

Principe de continuité. — Mais ici se présente une diffi-

culté grave, qui tient au caractère essentiellement local de la composition minéralogique dans les sédiments. Toute région de sédimentation est un ancien *bassin*, maritime ou lacustre, qui était limité par des rivages et dont l'histoire a dû différer de celle des bassins plus ou moins éloignés. Même, dans l'intérieur d'un bassin donné, les dépôts changeaient soit avec la nature de la côte, soit avec la distance au rivage. D'après cela, une couche d'argile, par exemple, se transforme peu à peu, dans une direction déterminée, et passe latéralement à un sable ou à un calcaire. Un dépôt donné ne représente donc qu'un *épisode local*. La suite de ces épisodes, c'est-à-dire l'his-

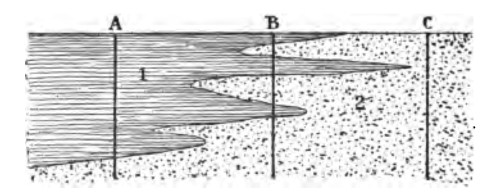


Fig. 37. — Passage d'un sédiment vaseux 1 à un sédiment arénacé 2.

toire géologique, si on la déduit d'un puits percé en A (fig. 37), à travers une couche puissante d'argile, différera sensiblement de celle qu'on établirait à l'aide d'un sondage fait en B, où l'argile alterne avec du sable, et plus encore en C, où l'élément arénacé domine sans partage. Aussi importe-t-il de trouver certains caractères qui permettent d'établir le *synchronisme* des dépôts de natures diverses, ou, comme on dit, des *facies* divers que peut revêtir une même époque sédimentaire.

Le premier de ces caractères est la *continuité* des assises. Partout où leur transformation latérale peut être suivie pas à pas, il est permis d'admettre que le dépôt a été simultané. Malheureusement l'état de la surface, presque toujours masquée par la végétation, rend cette constatation souvent impossible et elle est très difficile dans les pays disloqués, où fréquemment des cassures interrompent les assises et les font buter contre d'autres tout à fait différentes (fig. 38). Une cas-

sure qui sépare deux massifs, dont l'un a glissé, relativement à l'autre, sur le plan de la fente, s'appelle une *faille* et la quantité dont une assise donnée a glissé se nomme le *rejet* de la faille. La rencontre d'accidents de ce genre, aussi habituels que compliqués dans les pays de montagnes, rend très malaisé le rôle du *stratigraphe*, c'est-à-dire de celui qui cherche à suivre les *strates* ou couches sédimentaires et à tracer leurs *affleurements*, autrement dit leurs intersections avec la surface du sol.

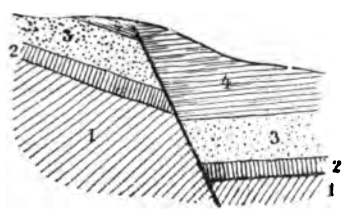


Fig. 38. — Exemple de faille.

Emploi de l'argument paléontologique. — C'est alors qu'intervient avec grande efficacité l'*argument paléontologique*. Chaque sédiment, avons-nous dit déjà, contient d'ordinaire, à l'état de fossiles, les restes plus ou moins reconnaissables des êtres contemporains de son dépôt. D'autre part, l'étude de ces êtres du passé ou la *paléontologie* nous enseigne que la population organique n'a cessé de se renouveler, à la surface du globe comme dans les profondeurs des mers; qu'à chaque époque correspondent des types spéciaux, de plus en plus éloignés de la nature actuelle à mesure qu'on remonte le cours des âges; enfin que le tout forme une série vitale parfaitement ordonnée, où il n'y a pas de lacunes.

Les sédiments marins ayant beaucoup plus d'étendue que les dépôts d'origine continentale, c'est surtout aux faunes océaniques que ce *critérium* doit être appliqué, d'autant mieux que le milieu marin, par sa masse et sa profondeur, est moins exposé aux variations accidentelles qui peuvent influer sur les êtres terrestres. Sans doute il y a des animaux propres à chaque nature de dépôts, c'est-à-dire des espèces qui fréquentent les eaux limpides, tandis que d'autres préfèrent les sédiments vaseux et d'autres encore les plages arénacées. Mais à côté, si l'on se tient à une certaine distance du rivage, on trouve des animaux qui habitent surtout la haute mer et dont les dépouilles, qu'elles tombent sur le fond ou que le flot les

rejette à la côte, ont une signification paléontologique beaucoup plus générale que celle des coquilles littorales. Ce sont des êtres *pélagiques*, qui deviennent d'excellents moyens d'assimilation à distance pour les sédiments marins et, grâce à l'emploi judicieux de ce caractère, la succession des couches stratifiées acquiert chaque jour plus de précision. Par exemple, il est telle *ammonite* dont la rencontre, que le dépôt encaissant soit un calcaire, une argile ou un grès, est absolument décisive pour la détermination de l'âge relatif.

La méthode paléontologique permet de trancher, l'une après l'autre, la plupart des difficultés causées par le bouleversement des couches, et certaines anomalies, dont les stratigraphes cherchaient vainement la clef, ont été résolues par le seul secours des fossiles, animaux ou végétaux; car la méthode s'applique également, avec les précautions convenables, aux dépôts d'origine continentale.

Établissement des divisions. Discordances. — Le synchronisme des assises ayant été établi par le concours de la stratigraphie et de la paléontologie, il reste à les grouper, pour en constituer des divisions homogènes, qui partagent en périodes équivalentes la durée des temps géologiques. La succession des épisodes locaux observés en un point fait connaître une *histoire régionale*. Sans prétendre que toutes les histoires de ce genre puissent rentrer dans le même cadre, il importe de les comparer les unes aux autres et d'en tirer les éléments d'une *chronologie* relative, applicable au globe tout entier.

Pour cela, il faut être en mesure d'apprécier la valeur des *lacunes* observées. Il y a des cas où ces lacunes sont considérables et nettement accusées par la disposition des dépôts, lorsque des couches horizontales ou peu inclinées reposent en discordance sur les tranches de sédiments plus anciens, redressés sous un angle notable (fig. 39). Alors on peut affirmer qu'entre le dépôt des deux séries il s'est produit un grand phénomène de dislocation, d'où a pu résulter une longue interruption de la sédimentation.

D'autres fois, sans que l'horizontalité des couches ait été sensiblement affectée, on voit un dépôt reposer *transgressivement*, c'est-à-dire par débordement, sur des sédiments inéga-

lement anciens, ce qui apporte la preuve du retour de la mer sur des territoires qu'elle avait depuis longtemps abandonnés.

Mais les *discordances de stratification*, comme on les appelle, sont loin d'avoir la généralité qu'on s'était plu dans le principe à y attribuer. A une certaine distance des points où on les

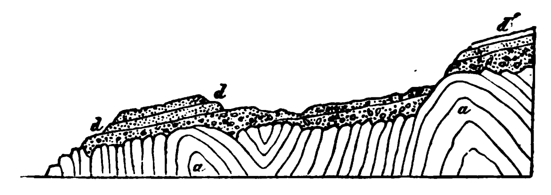


Fig. 39. — Grès dévonien *dd'*, reposant en discordance sur des schistes siluriens *a*.

observe, la série redressée montre, en profondeur, une inclinaison de moins en moins grande (fig. 40) et son allure finit par devenir tout à fait concordante avec celle des couches qu'elle supporte. Le phénomène de dislocation qui a produit la discordance a donc été local. C'est une *date* importante dans

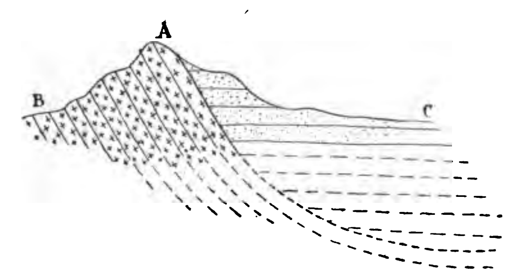


Fig. 40. — Localisation des discordances.

l'histoire de la région; mais cette date est sans signification pour les régions tant soit peu distantes, absolument comme les événements survenus en Europe peuvent passer inaperçus dans une autre partie du monde.

Lorsqu'une lacune a été causée par une émersion, il arrive assez souvent que le fait se révèle par l'état de la surface des

dépôts. Cette surface est usée, corrodée, perforée par des mollusques *lithophages*, c'est-à-dire appartenant à des espèces qui ont l'habitude de se creuser un logement, au niveau de la mer, dans les rochers qui forment le rivage. C'est donc l'indice d'une exposition plus ou moins prolongée à l'air.

Les *discordances paléontologiques* ont une signification plus étendue. La succession des formes organiques ayant été parfaitement ordonnée, si, entre deux sédiments de même *facies*, formés dans des conditions analogues, par exemple entre deux calcaires crayeux ou deux argiles schisteuses, on remarque une grande différence de faunes, on en pourra conclure avec certitude que les deux dépôts, fussent-ils stratigraphiquement concordants, ont dû être séparés par un assez long intervalle, correspondant au temps qui a été nécessaire pour que le renouvellement progressif des êtres vivants pût se produire.

Valeur relative des divisions. — Par l'application de ces diverses règles, on est parvenu à établir, dans l'histoire de la série sédimentaire, des divisions de plusieurs ordres, depuis celles qui correspondent à de simples épisodes locaux, et dont la signification est alors purement régionale, jusqu'aux groupes qu'on peut reconnaître sur toute la surface du globe.

Les premières divisions ont pour base la distinction des *lits*, *couches*, ou *strates*, qui se caractérisent au point de vue de la faune par une ou plusieurs espèces dominantes, formant un *horizon paléontologique*. Ensuite viennent les *assises* ou *zones* fossilifères, se groupant elles-mêmes en *étages* ou *sous-étages*; les étages à leur tour composent par leur association des *systèmes*, dont chacun embrasse une *période* et la réunion de plusieurs systèmes forme un *groupe*, auquel correspond une des grandes *ères* de l'histoire terrestre. Quelquefois, entre les systèmes et les étages, on est conduit à intercaler une division en *séries*.

Plus une division est d'ordre élevé et plus grande est l'étendue sur laquelle on peut la reconnaître; mais aussi ses limites deviennent de moins en moins nettes; non qu'elles ne puissent être précisées en chaque point; mais parce que ces limites locales, justifiées individuellement par le changement des sédiments et des faunes, ne coïncident pas toutes ensemble et

peuvent représenter des moments un peu différents de l'histoire générale de l'écorce, aucun événement ne s'étant fait sentir partout à la fois.

Chronologie des éruptions. — Complétons maintenant l'exposé des principes de la chronologie géologique, par l'indication des règles à l'aide desquelles on détermine l'*âge des roches éruptives*.

Toute roche éruptive est naturellement plus jeune que les terrains, stratifiés ou non, qu'elle traverse en *filons* ou dans lesquels elle a été injectée en *nappes d'intrusion*, en leur faisant parfois subir un métamorphisme notable. D'autre part, quand un conglomérat contient, à l'état de cailloux roulés, des fragments d'une roche éruptive bien déterminée, c'est que l'épanchement et la consolidation de cette roche avaient précédé le dépôt du conglomérat. Ainsi beaucoup de porphyres quartzifères ont pu être facilement classés, parce que des fragments identiques ont été retrouvés, soit dans les couches du terrain houiller, soit dans celle du grès rouge permien.

Grandes divisions géologiques. — A la base de tous les terrains se place une formation, dont l'origine est encore très discutée, parce que sa nature participe à la fois de la cristallisation propre aux roches massives et de la stratification qui distingue les couches de sédiment. Nous l'étudierons à part sous le nom de *terrain archéen*.

Sur ce terrain repose la série des formations fossilifères, dont l'étude conduit à diviser le passé du globe en trois grandes ères :

1° L'ère *primaire* ou *paléozoïque*[1], où les masses continentales étaient à peine esquissées et où les conditions physiques offraient, sur toute la terre, une remarquable uniformité. Les vertébrés n'y avaient guère d'autres représentants que les *poissons*, et les faunes marines étaient caractérisées par l'immense développement des mollusques *brachiopodes*, ainsi que par le règne d'une famille de crustacés qui s'est éteinte avant même que les temps primaires prissent fin, la famille des *trilobites*.

1. De *palaios*, ancien, et *zoon*, animal.

2° L'ère *secondaire* ou *mésozoïque*[1], pendant laquelle les conditions physiques ont commencé à se différencier avec les latitudes, tandis que les plantes *dicotylédones angiospermes* faisaient leur apparition sur les continents. Les *reptiles* y dominaient sans partage et l'empire des mers appartenait à la famille des *ammonites* proprement dites, née avec le début des temps secondaires et destinée à ne pas leur survivre.

3° L'ère *tertiaire* ou *néozoïque*, qui a vu les continents prendre leur assiette et acquérir leurs grandes lignes de relief actuelles, pendant que les zones de climats et les provinces organiques se dessinaient d'une façon définitive. Les *mammifères*, jusqu'alors complètement atrophiés, sont devenus les maîtres de la terre ferme, où le monde végétal a déployé la plus grande richesse de formes qu'il ait jamais connue.

Quant à l'ère actuelle, ou *quaternaire*, elle est caractérisée par l'apparition de l'homme, dernier venu de la Création, qui ne s'est enrichie depuis lors d'aucun type nouveau.

CHAPITRE II

TERRAIN ARCHÉEN

§ 1

GÉNÉRALITÉS SUR LE TERRAIN ARCHÉEN

Notion de croûte primitive. — Si l'on admet, comme nous le faisons, l'idée de la fluidité primitive du globe, il faut se représenter, à l'origine des temps géologiques, notre terre comme une sphère liquide en grande partie métallique, sur laquelle les matières fondues devaient être superposées par

1. *Mesos*, moyen.

ordre de densités. La surface était donc occupée par ces produits d'oxydation que nous avons déjà analysés en traitant des roches éruptives, c'est-à-dire par les divers *silicates*, qui formaient véritablement la *scorie* du noyau métallique. Mais ces minéraux, plus légers que les métaux sous-jacents, étant en même temps beaucoup plus réfractaires, devaient, avec le progrès du refroidissement, être exposés à prendre les premiers l'état solide. Il est vrai que cette solidification, en accroissant leur densité, pouvait les faire descendre un peu dans la masse fluide, au sein de laquelle ils entraient de nouveau en fusion, mais en refroidissant le bain environnant. De cette manière, au bout d'un certain temps, une croûte continue a dû se prendre en masse, interceptant pour toujours le contact de la sphère fondue avec l'atmosphère extérieure. D'ailleurs cette croûte était certainement composée, en majeure partie, des silicates les plus légers, de ceux qui sont habituels aux roches acides, ce qui permet d'augurer que sa composition était analogue à celle du granite; à cette différence près que, la solidification ayant eu lieu en présence de l'atmosphère, la croûte primitive ne pouvait présenter ce grain spécial qu'a engendré, dans le granite, une très lente solidification, sous pression, dans un espace clos. En particulier, s'étant formée au sein d'un liquide à surface libre, elle devait offrir, dans l'arrangement de ses matériaux, quelque ordonnance accusant l'intervention de la pesanteur.

Réactions initiales de la croûte. — Du reste, à peine cette pellicule était-elle formée qu'elle dut être soumise à de puissantes réactions physiques et chimiques. En effet, l'eau des océans, et avec elle les principes actifs qu'elle renferme, tels que les chlorures alcalins, étaient originairement contenus en vapeurs dans l'atmosphère chaude des premiers âges, où leur présence seule engendrait une pression qu'on ne peut guère évaluer, vu le volume actuel de la masse océanique, à moins de *trois cents atmosphères*. Le refroidissement qui a fait naître la croûte a dû entraîner la rapide condensation de ces vapeurs, qui sont venues former, à la surface de l'écorce, un bain d'une puissance chimique considérable, suffisante pour déterminer, dans les matériaux de la croûte, une cristallisa-

tion semblable à celle que produisent les réactions de la voie humide.

Le même bain ne pouvait non plus manquer d'exercer sur l'écorce une action mécanique analogue à celle que la mer exerce sur ses rivages. A peine formées, les roches primitives étaient exposées à une désagrégation, bientôt suivie, sans doute, d'une cristallisation nouvelle des éléments un instant séparés. De plus, les matières fondues sous-jacentes devaient, soit refondre partiellement la base de la croûte, soit s'y injecter fréquemment en veines ou veinules.

On est donc conduit à se représenter le terrain primitif comme une sorte de produit mixte, né du refroidissement, mais où les signes de l'état igné auraient été rapidement effacés par une cristallisation chimique; massif à l'origine, mais soumis, aussi bien à la base qu'au sommet, à des actions qui ont dû lui imprimer quelques-uns des caractères des dépôts stratifiés, notamment un arrangement des éléments en zones plus ou moins parallèles.

Difficultés du sujet. — Maintenant cette croûte primitive, à supposer qu'elle se soit ainsi formée, a-t-elle pu arriver jusqu'à nous? Constamment refondue à sa base, n'a-t-elle pas dû disparaître peu à peu, de telle sorte que ce qui subsisterait aujourd'hui, comme support de tous les terrains, ne serait plus formé que par les restes des premiers sédiments, nés de la destruction de la croûte, et modifiés par une perpétuelle injection de matières internes? Si la chose offre de l'intérêt au point de vue théorique, elle en a peu sous le rapport de la pratique; car il ne saurait y avoir une grande différence entre le résultat des diverses réactions physiques, mécaniques et chimiques, dont nous avons essayé de donner un aperçu, et celui d'une transformation de couches originairement détritiques, par injection de la substance des roches éruptives acides.

Ce qui est certain, c'est que partout où la base des formations sédimentaires peut être observée, elle se présente sous un aspect très uniforme, qui contraste avec la variété des sédiments superposés.

Les roches qui composent cette base sont à la fois *cristal-*

lines et *stratiformes*, souvent même *feuilletées*, et engendrent un terrain qu'on a justement appelé *cristallophyllien*. Pendant longtemps, on n'a pas hésité à y voir la croûte primitive du globe, en expliquant sa formation par l'ensemble des actions indiquées plus haut. Seulement il était impossible d'en fournir la preuve irrécusable ; et, en revanche, l'observation a, de nos jours, considérablement multiplié les cas où il est possible de démontrer qu'une roche cristallophyllienne dérive, par métamorphisme, d'un ancien sédiment. Parfois même on constate que cette transformation a affecté des terrains relativement récents, appartenant au groupe secondaire ou même au groupe tertiaire.

Définition de l'archéen. — Dans ces conditions, il est prudent de renoncer à l'emploi du nom de *terrain primitif*, qui implique une idée préconçue et à la rigueur discutable, pour y substituer le mot de *terrain archéen*, qui signifie seulement le plus ancien de tous. Encore convient-il de se souvenir que le *facies archéen* peut couvrir des terrains qui n'appartiennent pas à la série la plus ancienne; de sorte que partout où les premiers géologues s'accordaient à reconnaître un massif archéen, c'est-à-dire inférieur à tous les sédiments connus, on est exposé à en retrancher, l'une après l'autre, toutes les parties pour lesquelles il sera possible d'établir avec certitude qu'elles sont dues à la transformation de sédiments d'âge défini.

§ 2

DESCRIPTION DU TERRAIN ARCHÉEN

Roches archéennes. — Les minéraux constituants du terrain archéen sont exactement les mêmes que ceux des roches éruptives. Il convient seulement d'y ajouter la *chlorite*, silicate d'alumine, de fer et de magnésie, qui forme des paillettes d'un vert foncé, flexibles mais dépourvues d'élasticité.

D'une manière générale, on peut dire que chacune des roches éruptives granitoïdes connues est représentée dans le terrain archéen par une variété de même composition, mais

qui laisse voir un arrangement stratiforme, étant à la roche massive correspondante ce que le gneiss est au granite.

La roche fondamentale de l'archéen est le *gneiss*, qui ne peut être mieux défini que comme un *granite à éléments orientés*, auquel la disposition des paillettes de mica, en veinules ou en lits sensiblement parallèles, peut donner un aspect tout à fait rubané (fig. 41). Dans le gneiss commun, le mica, en très fines lamelles, forme de minces traînées, séparées les unes des autres par des bandes où le quartz et le feldspath sont associés. Quelquefois le mica est assez abondant et assez régulièrement distribué pour que le gneiss devienne *schisteux* ou *feuilleté*, par suite de sa tendance à se débiter suivant les plans d'accumulation du mica.



Fig. 41. — Gneiss commun. — 1. Traînées de quartz et de feldspath. — 2. Lits de mica.

Après le gneiss, la roche archéenne la plus importante est le *micaschiste*, assemblage très schisteux de quartz et de mica. Ensuite viennent la *leptynite*, ou gneiss sans mica, les schistes à amphibole ou *amphiboloschistes*, ceux à pyroxène ou les *pyroxénites*, enfin les schistes à chlorite ou *chloritoschistes*. Quelques micaschistes à grain fin ont leur mica transformé en une substance à éclat soyeux, qu'on a longtemps prise pour du *talc* (hydrosilicate de magnésie), d'où le nom de *talcschistes* ou *talcites*, mais qui est en réalité une variété de mica, dite *séricite*.

En général, le gneiss occupe la base de l'archéen et l'orientation du mica devient de moins en moins distincte à mesure qu'on s'éloigne du sommet de la formation, le *gneiss granitoïde* de la base passant peu à peu au granite. Du reste, beaucoup de gneiss peuvent n'être que des granites laminés, et ce même laminage a pu transformer des roches basiques en schistes amphiboliques. Souvent la série se termine par des schistes riches en minéraux cristallisés, tels que la *staurotide*, le *disthène* et l'*andalousite*, silicates anhydres d'alumine; le

grenat, silicate d'alumine et de fer, le *glaucophane*, espèce bleuâtre d'amphibole, etc. Ces roches, qu'on observe à l'île de Groix, à Syra et en divers autres points des massifs archéens, ont été appelées *éclogites*.

Quelquefois des amandes ou des couches d'un marbre blanc, avec paillettes de mica, dit *cipolin*, sont subordonnées à la partie supérieure des gneiss. Ceux qui considèrent tous les calcaires comme d'origine organique en tirent un argument en faveur du caractère métamorphique de la série gneissique.

Le terrain archéen, partout où il affleure, donne naissance à des sols très peu fertiles. Le gneiss fournit des moellons et du caillou pour empierrement; le micaschiste, à cause de sa fissilité, est quelquefois employé, à défaut d'ardoises, pour la couverture des maisons.

Principaux massifs de terrain archéen. France. — Le terrain archéen affleure dans un certain nombre de régions, qui paraissent avoir formé les premiers noyaux des masses continentales, ou au cœur de certaines chaînes de montagnes, dans lesquelles la puissance des refoulements a été assez grande pour amener au jour des portions de l'écorce que recouvrait antérieurement une grande épaisseur de sédiments.

En France, la plus importante de ces régions est le *Plateau Central*, qui comprend l'Auvergne, le Limousin et les Cévennes. Au-dessous des formations volcaniques, qui sont venues tardivement s'épancher à sa surface, ce plateau laisse voir partout, grâce à la profondeur des vallées qui l'entament, une grande épaisseur de gneiss et de micaschistes, dont la partie supérieure est souvent riche en amphiboloschistes, pyroxénites, serpentines et amas de cipolins, tandis qu'à la base, sous les gneiss finement rubanés, on observe du gneiss granitoïde. Dans les Cévennes, cet ensemble paraît avoir 6 000 mètres d'épaisseur, sans compter les schistes à séricite qui le surmontent.

Une succession semblable peut être relevée dans le Morvan, qui est aussi un des anciens îlots du sol français.

En Bretagne, les sédiments primaires sont encadrés entre deux bandes de terrain archéen : celle du nord, qui forme le pays de Léon, celle du sud, qui constitue la Cornouaille bre-

tonne et se poursuit en s'élargissant jusqu'à la Loire. Aux environs de Quimperlé, on peut constater que les gneiss un peu granitoïdes, avec micaschistes subordonnés, supportent d'autres gneiss à grain plus fin, que couronnent les micaschistes et chloritoschistes du Pouldu. Les éclogites, ou schistes à minéraux de l'île de Groix, formeraient la partie supérieure du système.

Le gneiss se retrouve encore au centre des Vosges, dans les Maures ou dans les Pyrénées.

Toutefois, dans ces diverses régions, on n'observe pas de contact bien net entre l'archéen et le plus ancien des terrains stratifiés. Il pourrait donc se faire qu'une grande partie, sinon la totalité, des gneiss et micaschistes de France, représentent seulement un état métamorphique de ce que nous apprendrons plus tard à connaître sous le nom de terrain *précambrien.*

Pays étrangers. — Il en est autrement pour certains territoires cristallophylliens situés hors de France.

Ainsi le nord de l'Europe paraît avoir possédé autrefois une bande très étendue de terrain archéen, dont la Finlande, la Scandinavie, l'Écosse et le Groenland seraient des fragments aujourd'hui séparés. A cette bande appartient le *gneiss fondamental* des Hébrides. C'est en Finlande que ce terrain paraît présenter le plus de complication. Reposant sur le gneiss granitique et lui-même pénétré de granite et de diverses roches basiques, l'archéen de Finlande, épais de 6 000 à 7 000 mètres, comprend des schistes dits *ladogiens* (du lac Ladoga) et *bottniens,* ces derniers, plus récents, développés aux environs de Tammerfors, et contenant de véritables conglomérats à galets souvent déformés.

Comme cet ensemble, affecté de plissements énergiques, est séparé du plus ancien des terrains fossilifères par plusieurs milliers de mètres de schistes, grès, conglomérats, etc., qui s'en distinguent nettement dans leur composition et leur allure, on ne peut hésiter, quelque idée qu'on se fasse de son origine, à le regarder comme de l'archéen typique.

Pour la même raison, c'est à l'archéen qu'il convient d'attribuer les gneiss plus ou moins granitoïdes de la région des

grands lacs de l'Amérique du Nord, qui prolongent sur ce continent la bande archéenne de l'Europe septentrionale. On en a fait le terrain *laurentien* (du nom du Saint-Laurent). Seulement ce terrain, tel qu'on le comprenait autrefois, renfermait un ensemble hétérogène de roches dont plusieurs n'y ont été introduites que par dislocation. Tel serait, en particulier, le cas des célèbres calcaires laurentiens où on avait observé certaines apparences prises, à tort du reste, pour le plus ancien des fossiles et qualifiées d'*Eozoon canadense*. En revanche, il n'y aurait pas lieu d'hésiter à mettre dans l'archéen plusieurs milliers de mètres de micaschistes et de gneiss, couronnés, aux abords du lac Huron, par une égale épaisseur de quartzites, de grès, de schistes micacés, de schistes ferrugineux (série *huronienne* des Américains).

Un terrain semblable affleure par places en Sibérie et en Mongolie.

Quant aux gneiss et aux micaschistes qui se montrent en divers points de l'Afrique, le manque absolu de formations paléozoïques fossilifères à leur contact empêche de dire avec certitude s'ils sont d'âge archéen, ou s'ils ont seulement acquis par métamorphisme le facies de ce terrain.

Cette prudence s'impose d'autant plus que certains gneiss des Alpes, dans lesquels on n'hésitait pas autrefois à voir de l'archéen typique, sont aujourd'hui reconnus pour des sédiments métamorphiques, appartenant *à la partie supérieure de la série paléozoïque*. Tel serait, en particulier, le cas du *gneiss œillé* du Grand Paradis, ainsi nommé de l'aspect que lui donne le développement, dans sa masse, du feldspath en nodules lenticulaires. Et la même conclusion devrait s'appliquer au gneiss granitoïde d'Antigorio, base du massif du Simplon, où jusqu'ici on le considérait comme le terme le plus inférieur de l'archéen.

D'après ce qui précède, on voit combien il est difficile de se prononcer avec certitude sur l'âge archéen d'un ensemble cristallophyllien donné. Tout ce qu'on peut dire, c'est que, plus un tel ensemble se montre inférieur aux premiers sédiments fossilifères, et plus il est affecté de dislocations ou d'injections granitiques. Ces deux phénomènes auraient été la

règle à l'époque archéenne, tandis que plus tard ils sont devenus l'exception.

CHAPITRE III

ÈRE PRIMAIRE

§ 1

GÉNÉRALITÉS SUR L'ÈRE PRIMAIRE

Définition de l'ère primaire. — Dans le terrain archéen, tel que nous l'avons décrit, il existe, surtout à la partie supérieure, des sédiments incontestables, schistes, grès et conglomérats. Il y a donc passage insensible entre ce terrain, d'origine plus ou moins énigmatique, et la grande série sédimentaire qu'il supporte. Seulement les injections de nature granitique et les dislocations violentes qui affectent partout l'archéen, et font pour ainsi dire partie de sa constitution, cessent à un certain moment de devenir la règle constante. C'est à ce moment qu'on peut faire commencer l'*ère primaire*, celle où le jeu des actions extérieures s'est pour la premiere fois exercé, d'une façon normale, aux dépens de noyaux cristallophylliens déjà consolidés, en donnant naissance à des sédiments que le métamorphisme n'a touchés que par occasion, et où l'océan, prenant peu à peu sa composition caractéristique, a dû devenir habitable pour les organismes marins.

Quand cette circonstance s'est réalisée, la vie n'a pas tardé à se répandre en abondance dans les eaux marines, tandis que les continents, dont l'assiette s'affermissait, finissaient par porter, avec une riche végétation, les premiers représentants des êtres terrestres à respiration aérienne.

Phases et conditions générales de l'ère primaire. — Ce

progrès s'est accompli par étapes, qui motivent la division des temps primaires ou *paléozoïques* en cinq périodes :

1° La période *précambrienne*, ainsi nommée parce qu'elle a précédé l'étage cambrien, le premier qui soit incontestablement fossilifère, et qui lui-même tire sa désignation de *Cambria*, nom latin du pays de Galles. Le précambrien a reçu en Amérique le nom d'*algonkien*. Jusqu'à présent, les traces organiques y sont nulles ou indistinctes.

2° La période *silurienne*, qui tire son nom des *Silures*, anciens habitants de l'Angleterre; les vertébrés n'y sont représentés que tardivement, et seulement par des poissons.

3° La période *dévonienne*, dont les sédiments sont développés dans le Devonshire. Les poissons y abondent et on constate l'éclosion de la première flore terrestre.

4° La période *carboniférienne*, qui a vu se constituer les grands gisements houillers de l'Europe, de la Chine et des États-Unis. La végétation terrestre y prend tout son essor, et les amphibies fréquentent les marécages houillers.

5° La période *permienne*, composée de formations dont le type a été choisi en Russie dans le gouvernement de Perm. On y assiste à la disparition des crustacés dits *trilobites*, qui avaient caractérisé les temps primaires, ainsi qu'à la première éclosion des *reptiles* proprement dits.

Les premiers termes de cet ensemble ont souvent des caractères qui les rapprochent plus ou moins de l'archéen, et leur ont fait donner le nom de *terrains de transition*.

En tout cas, de la base au sommet, toutes les formations paléozoïques ont cela de commun que les conditions physiques, telles qu'on peut les déduire de la nature et de la répartition des organismes fossiles, semblent avoir été les mêmes sur tout le globe. Ni l'influence des latitudes, ni celle des saisons ne paraissent s'être fait sentir durant l'ère primaire.

A ce système appartiennent les *phyllades de Saint-Lô*, en couches habituellement verticales, dures et satinées en profondeur, mais altérées sur quelques décimètres à partir de la surface et donnant une terre argileuse propre à l'établissement des herbages, tandis que toute autre culture y serait difficile. La partie supérieure de ce système schisteux, dont l'épaisseur se compte par milliers de mètres, est constituée par les *schistes de Granville*, lesquels s'entremêlent de conglomérats. En Bretagne, le précambrien est représenté par la puissante série des *schistes de Rennes*, ainsi que par les phyllades de Douarnenez. Des calcaires, siliceux ou magnésiens, y apparaissent par endroits.

Dans le Trégorrois comme à Jersey, les schistes précambriens sont entremêlés de roches granitiques et porphyriques, qui attestent que, dans cette région, une notable activité éruptive a marqué la fin de la période.

Les phyllades se poursuivent en Vendée, où ils sont très souvent luisants et satinés, par suite de la séricite qui s'y est développée en fines lamelles. Cette transformation est un effet de métamorphisme. Du reste, au contact du granite qui les a percés, beaucoup des phyllades du Cotentin sont devenus *maclifères*, c'est-à-dire qu'il s'y est formé des nodules ou des cristaux de *macle*.

Du même âge sont les schistes sériciteux de Saint-Léon (Allier), les phyllades des environs de Brive, renfermant les ardoises d'Alassac et de Travassac, les schistes luisants ou talcites des Cévennes, qui forment au-dessus des gneiss une assise épaisse de 4 000 mètres, les schistes de Barr et d'Andlau, en Alsace, devenus métamorphiques au contact du granite, les schistes et grès schisteux à grain fin de Przibram en Bohême, avec traces attribuées à des vers arénicoles.

§ 3

SYSTÈME SILURIEN
1° ÉTAGE CAMBRIEN

Données générales sur le système silurien. — En général, dans l'Europe occidentale, le dépôt des assises siluriennes a été séparé de celui des sédiments précambriens par une période de dislocations, qui a introduit entre les deux systèmes une discordance caractérisée, si bien qu'il y a nombre de points où les couches presque horizontales du silurien inférieur reposent sur les tranches des phyllades précambriens, redressés jusqu'à la verticale. La série des sédiments siluriens est d'ailleurs très variée et contraste par ce caractère comme par l'abondance des faunes marines avec la monotonie et la pauvreté organique des déptôs précambriens.

Deux grands faits caractérisent la période silurienne : D'abord, pour la première fois, l'écorce a acquis assez de stabilité en certains points pour que des sédiments du début de cette période aient pu arriver jusqu'à nos jours sans que leur horizontalité ait été sensiblement dérangée. Il en est ainsi en Scandinavie, au Canada et en Sibérie.

Ensuite on voit apparaître au milieu de formations très nettement stratifiées, schisteuses, calcaires ou gréseuses, et souvent exemptes de toute espèce de métamorphisme, une faune marine remarquable par son éclosion en quelque sorte immédiate; c'est la faune cambrienne, celle que Barrande avait appelée *faune primordiale*, et où dominent les restes de crustacés appartenant à la famille des trilobites, spécialement au genre *Paradoxides* (fig. 43), ainsi que les brachiopodes du genre *lingule* (fig. 44) destiné à traverser, presque sans altération, toute la durée des temps géologiques, tandis que l'existence des trilobites ne sera qu'éphémère. On y voit aussi des empreintes problématiques qualifiées d'*Oldhamia* (fig. 42).

Après ces préliminaires, des îlots de terrain primitif, noyaux des futurs continents, se dessinent, servant d'appui aux sédi-

un poudingue, où les éléments du système inférieur se retrouvent en galets, accusant la proximité d'un rivage. A ce poudingue succède la puissante assise des schistes verts et lie-de-vin, qui fournissent les ardoises violettes, si largement exploitées à Penrhyn et à Llanberis, et que couronnent des schistes à paradoxides. Ensuite, après quelques intercalations gréseuses, indice du retour de conditions littorales, la série schisteuse reparaît sous forme de roches noires ou grises, se débitant de préférence en dalles, et qu'on a nommées *dalles à lingules* (*Lingula flags*). Cette dernière assise est du cambrien supérieur et contient, dans ses couches les plus élevées, un hydrozoaire particulier, *Dictyonema sociale*.

Très différente, et surtout beaucoup moins puissante, est la série des couches cambriennes en Suède. Elle débute par un grès, directement superposé au gneiss, et abondant en traces d'origine problématique, où d'abord on avait cru voir des tiges de végétaux (*Eophyton*), mais qui sont plutôt des pistes d'animaux ou des traces d'objets mécaniquement traînés sur un rivage. Le cambrien moyen est à l'état de schistes noirs dits *alunifères*, à cause de leurs efflorescences de sulfate d'alumine et de fer. Ces schistes, qui contiennent de petits lits de calcaire noir, sont riches en *Paradoxides* et en *Olenus*, et couronnés par d'autres schistes alunifères à *Dictyonema*. On retrouve ces derniers en Russie, où ils sont séparés par un grès d'une argile bleue à *Olenellus*, qui repose sur le granite. Ces diverses couches sont horizontales et n'offrent pas la moindre trace de métamorphisme. Leur nature minéralogique ne les distingue en rien des sédiments qu'on peut rencontrer dans les groupes secondaire et tertiaire; tant il est vrai que le temps, à lui tout seul, est incapable de déterminer une modification dans l'état d'un dépôt, si des influences spécialement actives n'entrent pas en jeu.

Europe centrale, Ardenne. — La nature des dépôts cambriens sur la Baltique laisse présumer que le rivage ne devait pas être loin de là. Respectant presque toute la Russie, la mer passait en Pologne, et s'étendait sur l'Europe centrale, où elle a laissé, en Bohême, les célèbres schistes à paradoxides de Ginetz et de Skrey. La faune abondante de trilo-

bites qu'ils contiennent avait été considérée par Barrande comme la première en date, et il l'avait nommée *faune primordiale*. Il est aujourd'hui reconnu que ces schistes ne représentent que le cambrien moyen.

On retrouve l'étage dans l'Ardenne, où il est entamé, entre Mézières et Givet, par la profonde vallée de la Meuse. Sur les flancs de cette gorge, on voit se succéder, en assises fortement disloquées, les schistes et quartzites de Deville, avec ardoises (Deville, Rimogne); les schistes ardoisiers violets et verts de Fumay, semblables à ceux du Pays de Galles; les schistes noirs pyritifères et les quartzites schisteux (quartzophyllades) de Revin; enfin il y faut ajouter les schistes durs (*coticules* ou pierres à rasoirs) des environs de Salm. Tout cet ensemble est assez fortement métamorphique et les schistes abondent en petits cristaux de grenat, de rutile (oxyde de titane), de fer magnétique, de fer oligiste et d'autres minéraux. On n'a encore trouvé de fossiles que dans la partie supérieure (*salmien*), où se rencontre le *Dictyonema sociale* du cambrien supérieur anglais et scandinave. Quant aux *Oldhamia* et *Arenicolites* des couches inférieures, ce sont des traces d'origine très problématique.

Cotentin, Armorique, Montagne-Noire, Région méditerranéenne. — Dans le massif qui embrasse le Cotentin et l'Armorique, le rivage occidental de la mer cambrienne, baignant un continent atlantique, paraît marqué par l'apparition, à la base de l'étage, de conglomérats à gros fragments roulés, parfois à l'état d'arkoses, qu'on observe depuis La Hague, Jersey et Granville jusqu'au cap de la Chèvre (Finistère). D'ordinaire, ces conglomérats ont une couleur rouge qui leur a fait donner le nom de *poudingues pourprés*. Les galets de quartz laiteux s'y détachent en blanc sur la pâte d'un rouge foncé. Ces poudingues, souvent en discordance nette avec les phyllades précambriens, supportent des schistes lie de vin dits *schistes rouges*, quelquefois mêlés de calcaires (Laize en Calvados), et où l'on rencontre de curieuses cannelures dont on a fait le genre *Vexillum*. Puis viennent des schistes verts et des arkoses feldspathiques.

En Bretagne, cet ensemble est sans fossiles; ce qui se com-

péninsule ibérique, un grès à lingules et à bilobites, sans doute formé en bordure du continent atlantique, supportant toujours des schistes à calymènes.

Par la Sardaigne, la mer ordovicienne d'Espagne se reliait à celle des Alpes carniques, elle-même en relation probable avec le bassin russe.

Asie, Australasie, Amérique. — En Sibérie, entre le Jenisséi et la Lena, l'ordovicien avec *Asaphus* succède régulièrement au cambrien. Mais ce n'est plus un régime marin franc; les sédiments de couleur rouge abondent, mélangés avec des calcaires à orthocères comme ceux de la Russie; et, vers le haut, il s'y montre des dépôts étendus de gypse et de sel, indices d'un assèchement en progrès.

L'étage a laissé des traces dans la Chine orientale, la Birmanie, l'Himalaya, la province de Victoria (Australie) et la Nouvelle-Zélande.

Dans l'Amérique du Nord, où l'ordovicien couvre de très grandes surfaces, son terme le plus remarquable est le *calcaire de Trenton*, à *Asaphus*. C'est dans une couche rapportée à cette assise qu'auraient été trouvés les plus anciens restes de poissons; et les couches qui la surmontent ont fourni les premiers vestiges d'une flore terrestre.

La mer ordovicienne couvrait les régions arctiques, du Groenland à l'Alaska. Enfin elle passait, comme celle du cambrien, sur les Cordillères argentines.

§ 5

SYSTÈME SILURIEN
3° ÉTAGE GOTHLANDIEN

Données générales sur le gothlandien. — La géographie de l'époque gothlandienne ne diffère pas d'une façon très sensible de celle de l'ordovicien. On peut seulement remarquer qu'il s'introduit, dans toute l'Europe occidentale, une plus grande uniformité de caractères, et que les épisodes arénacés y deviennent beaucoup plus rares. Le régime marin qui prévalait alors était favorable au développement des graptolithes

surtout de ceux du genre *Monograptus*, qu'on voit prospérer à peu près partout, leurs restes se trouvant toujours dans des sédiments noirs et charbonneux. Les trilobites qui dominent dans les mers du nord sont ceux du genre *Encrinurus* et des brachiopodes particuliers, *Pentamerus*, *Strophomena*, font cortège à de nombreux *orthocères* et à divers céphalopodes enroulés, tandis que les polypiers groupés, tels que *Favosites*, deviennent fréquents. C'est aussi avec cet étage qu'apparaissent en Europe les restes de poissons ganoïdes, accompagnés de grands crustacés, tels qu'*Eurypterus*.

Angleterre. Régions baltiques. — C'est l'Angleterre qui a longtemps fourni le type des divisions du gothlandien. Dans le Shropshire, on distinguait de bas en haut trois assises : celle de *Llandovery*, ayant pour terme principal un *calcaire à pentamères*; l'assise *de Wenlock*, marquée par le calcaire de Dudley; enfin, en haut, l'assise schisteuse et gréseuse de *Ludlow*, terminée par un *bone-bed* ou couche à ossements, avec de nombreux restes de poissons et des débris de plantes terrestres lycopodiacées. Dans cet ensemble, ce qui attire surtout l'attention, grâce à l'abondance et à la merveilleuse conservation des fossiles, c'est le calcaire de Wenlock ou de Dudley, avec ses beaux crinoïdes, ses trilobites, ses brachiopodes et ses polypiers.

Les assises du Shropshire trouvent leur exact équivalent dans la série des calcaires marneux de l'île de Gothland. Complètement exempts de métamorphisme, comme ceux de Dudley, dont ils reproduisent la faune, ces calcaires affleurent aussi en Esthonie et en Livonie, montrant toujours des pentamères à la base et ensuite des *Encrinurus*. Mais, en quelques points de la Suède, comme dans le sud-est de l'Angleterre, ce sont des schistes à *Monograptus*, avec acéphalés tels que *Cardiola interrupta*, qui représentent l'étage, annonçant ce qui dominera dans l'Europe occidentale.

Europe médiane et méridionale. — En effet, on ne voit guère que des schistes à graptolithes, soit sur le bord de l'Ardenne, soit au Boulonnais. En Normandie, des schistes noirs tachant les doigts, dits *ampélites*, avec *Monograptus*, supportent un calcaire noir, souvent noduleux, à orthocères

(Saint-Sauveur-le-Vicomte, Feuguerolles), avec graptolithes et *Cardiola interrupta*. Une succession analogue caractérise les dépôts gothlandiens de la Bretagne, où les ampélites de la base se transforment parfois en *phtanites* ou silex noirs, tandis qu'au-dessus des nodules à orthocères apparaît dans des schistes un entomostracé, *Bolbozoe*.

Ce régime graptolithique devait aller fort loin dans la direction de l'est; car on en trouve, dans le Kellerwald et le Hartz, des traces qui, par la Thuringe, se relient aux schistes à graptolithes de la Bohême. Seulement, comme l'observation ne montre rien entre la Normandie et le massif rhénan, on pourrait croire que la mer gothlandienne n'a point passé sur la région des Vosges et de la Forêt Noire, si récemment on n'avait découvert, dans les conglomérats du grès vosgien, des cailloux de phtanite noir à graptolithes. Or ces cailloux proviennent de la destruction d'un massif qui ne devait pas être très éloigné de l'emplacement actuel du Jura. On peut donc se demander si les terrains cristallophylliens des Alpes, sous leur aspect archéen, ne cacheraient pas les restes, devenus méconnaissables, du silurien.

En tout cas, le gothlandien est très net dans la Carniole et les Alpes orientales, reliant les affleurements de la Bohême à ceux du midi de la France (Montagne Noire et Pyrénées), toujours caractérisés par des schistes noirs à graptolithes et nodules, avec orthocères et cardioles. Comme d'ailleurs des schistes à *Monograptus* ont été reconnus en Espagne, au Portugal et en Sardaigne, on voit quelle devait être l'étendue occupée par cette mer au régime si uniforme, contrastant avec la variété que dénoncent les sédiments ordoviciens.

En Bohême, les schistes à *Monograptus* sont surmontés par un calcaire noir, fétide et cristallin, dont certains échantillons pourraient être confondus avec les calcaires à graptolithes du midi de la France. La formation se poursuit en Pologne; mais le rivage oriental devait être proche; car, en Podolie, on trouve des couches littorales à poissons et crustacés.

Asie, Australie, Afrique, Amérique. — Probablement la mer faisait le tour de la Finlande, pour rejoindre l'embouchure de la Petchora et pousser quelques pointes sur la Sibérie

septentrionale, où ses restes ont été reconnus dans les îles de la Nouvelle-Sibérie ainsi que sur la haute Viliouï.

D'autre part, le gothlandien est signalé en Birmanie, ainsi qu'en divers points de l'Australie. Les schistes à graptolithes ont été reconnus dans le Sahara central et au Maroc.

En Amérique, où la jonction était largement établie entre les mers arctiques et celles qui couvraient le bassin du Mississippi, les termes importants du gothlandien sont : le grès à pentamères de Clinton, et le calcaire du Niagara (supportant la célèbre chute de ce nom), qui renferme la faune de Wenlock. Au sommet, le prochain assèchement se traduit par les dépôts de gypse et de sel (groupe de *Salina*).

Dans les parages arctiques américains, jusqu'aux plus hautes latitudes atteintes (terre de Grinnell), on retrouve le gothlandien à *Encrinurus* et *Favosites*. La présence des grands polypiers constructeurs, jointe à l'uniformité des faunes, atteste qu'un même climat chaud régnait alors sur tout le globe.

§ 6

SYSTÈME DÉVONIEN

1° DÉVONIEN INFÉRIEUR OU SÉRIE ÉODÉVONIENNE

Données générales sur le système dévonien. — Un changement considérable marque l'ouverture de la période dévonienne. Une importante chaîne de montagnes, la chaîne *calédonienne*, vient de surgir, de l'Écosse à la Scandinavie. Toute l'Europe septentrionale émerge, et la terre ferme gagne du terrain dans les régions arctiques comme dans l'Amérique du Nord, tandis qu'elle en perd sur l'emplacement du bassin des Amazones.

Ce n'est donc plus dans le nord de l'Europe qu'il faut aller chercher les formations marines de l'étage; c'est sur la bordure du continent boréal qui vient de se constituer, dans les régions de l'Ardenne et du massif rhénan, ou bien encore dans le sud et l'est de la Russie, où la sédimentation n'a pas été troublée, comme dans l'ouest de l'Europe, par le voisinage trop immédiat des îlots qui subsistaient.

En bordure de la chaîne calédonienne se sont formées de puissantes couches de conglomérats et de grès, renfermant en abondance des restes de *poissons*. Ces restes appartiennent, en grande partie, à la famille des *ganoïdes* (fig. 50) ou poissons

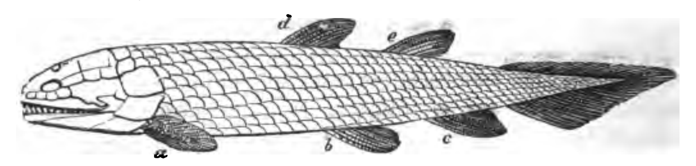


Fig. 50. — *Osteolepis*, poisson ganoïde dévonien.

cuirassés à nageoire caudale dyssymétrique, dont le corps était revêtu d'une véritable carapace écailleuse.

Les ganoïdes ne sont plus représentés de nos jours que par un petit nombre d'espèces habitant les rivières de l'Afrique, de l'Amérique du Nord et de l'Australie; d'où l'on peut inférer que les conglomérats dévoniens qui les contiennent ont dû se déposer dans des eaux douces ou saumâtres.

Plus loin, dans le domaine maritime, on retrouve des trilo-

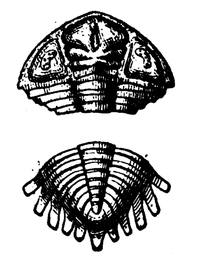


Fig. 51. — *Cryphæus Michelini* (tête et abdomen).

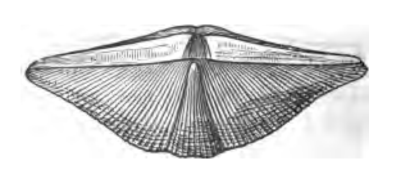


Fig. 52. — *Spirifer Verneuili*.

bites, tels que *Phacops* et *Cryphæus* (fig. 51), mais surtout des brachiopodes, particulièrement des *spirifères* (fig. 52) et des *stringocéphales*.

Au nombre des céphalopodes se trouvent maintenant les *goniatites* (fig. 53), c'est-à-dire les premiers représentants de la grande famille des *ammonoïdés*, dont les cloisons, d'abord

très simples (fig. 54), iront se compliquant de plus en plus, sans que le *stade goniatite* cesse d'être traversé, dans l'état embryonnaire, par ces animaux plus différenciés. Grâce aux ammonoïdés, céphalopodes nageurs, moins sensibles à la variété des conditions extérieures locales, la détermination du synchronisme des sédiments marins va pouvoir disposer d'un moyen d'information supérieur à tous les autres.

A la faune dévonienne appartiennent encore de nombreux crinoïdes et des polypiers à opercule, du genre *Calceola*

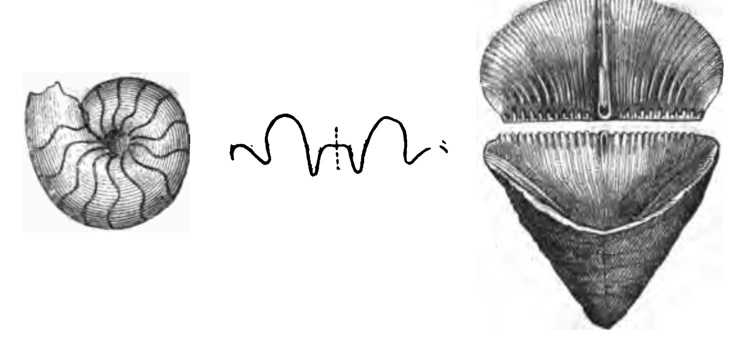


Fig. 53. — *Goniatites retrorsus.* Fig. 54. — Ligne de suture de *Goniatites* (*Gephyroceras, Manticoceras*) *intumescens.* Fig. 55. — *Calceola sandalina.*

(fig. 55), très caractéristique de la partie moyenne du système.

C'est avec la période dévonienne que commencent à apparaître, sur une grande échelle, les calcaires construits par l'activité des organismes. Les polypiers proprement dits et les foraminifères n'y ont que peu de part; la construction est surtout le fait des *Stromatopores* et autres organismes inférieurs, de la famille des hydrozoaires, dont l'accumulation donne naissance à des massifs réguliers de plusieurs centaines de mètres d'épaisseur.

Divisions du système dévonien. — Le système dévonien est partagé d'habitude en six étages; mais ces divisions se groupent naturellement en trois, que nous considérerons

successivement en les qualifiant simplement de dévonien inférieur, dévonien moyen et dévonien supérieur. Ce sont, jusqu'à présent, les seules qui puissent être aisément suivies sur toute la surface du globe. Commençons par le dévonien inférieur ou la série *éodévonienne*.

C'est à Gédinne, en Ardenne, qu'on a pris le type de l'étage inférieur ou *gédinnien*. Les environs de Coblentz ont fourni celui de l'étage suivant ou *coblentzien*, caractérisé par le grand épanouissement du genre *Spirifer*. D'un autre côté, la première apparition des goniatites, qui coïncide avec le début du dévonien, permet de faire intervenir la considération des céphalopodes cloisonnés, à l'aide desquels le dévonien inférieur peut être partagé en une première zone à *Tornoceras inexpectatum*, et une seconde à *Agoniatites fidelis* et *Anarcestes præcursor*.

Europe septentrionale. — Le soulèvement de la chaîne calédonienne a déterminé la formation, en Écosse et dans le nord de l'Angleterre, de grands estuaires ou de lagunes allongées, impropres à la vie marine. Là, l'érosion continentale, marchant sans doute de pair avec le soulèvement de la contrée, a entassé des milliers de mètres de grès bruns ou rouges, de conglomérats, de schistes et de marnes, constituant ce que les Anglais ont appelé *old red sandstone* ou *vieux grès rouge*. Des concrétions subordonnées au grès renferment les restes des poissons qui fréquentaient les estuaires, et la partie de l'*old red* qu'on peut attribuer au dévonien inférieur est celle dite série de Caithness, où se montrent les genres *Dipterus*, *Coccosteus*, *Cephalaspis*, *Pteraspis*. Elle passe d'ailleurs insensiblement aux grès qui terminent le gothlandien. Son épaisseur, en Écosse et en Irlande, n'est pas inférieure à 3 000 mètres; et un grès semblable, avec *Pteraspis*, apparaît au Spitzberg.

Massifs ardennais et rhénan. — Bien différente est la série ardennaise, à la fois épaisse, variée, et assez riche en fossiles. Elle s'est déposée dans un détroit, resserré entre le continent du Brabant et quelques îlots méridionaux, et ses couches se déploient, très disloquées, sur les flancs de la vallée de la Meuse.

Le gédinnien y débute par le *poudingue de Fépin*, véritable arkose. Les éléments de cette assise proviennent en partie de la destruction d'un massif de pegmatite, dont il serait malaisé d'indiquer la place originelle. L'étage, dont le fossile principal est *Spirifer Mercuri*, continue par des quartzophyllades chargés de fer oligiste, des schistes rouges et des psammites bigarrés.

Le coblentzien qui lui succède, épais de 1 500 à 2 000 mètres, laisse voir une succession de grès, parfois verts, de schistes décalcifiés ou *grauvackes*, de schistes rouges et de conglomérats (*poudingue de Burnot*). Les *Spirifer primævus* et *S. paradoxus* y dominent, avec un polypier très caractéristique, *Pleurodictyum problematicum*.

Dans le massif du Rhin, les quartzites gédinniens du Taunus (*taunusien*), avec schistes à séricite en bas, supportent la puissante assise de la *grauwacke à spirifères* de Coblentz. La roche dominante est un schiste décalcifié, entremêlé de quartzites en plaquettes. Comme en Ardenne, les masses calcaires font défaut dans cet ensemble, produit d'une sédimentation assez troublée, quoique bien moins variable que dans la vallée de la Meuse.

Europe orientale. — En suivant la formation vers l'est, on la voit passer peu à peu au facies tout différent qu'elle affecte en Bohême, où elle est entièrement à l'état de calcaires, riches à la fois en trilobites (*Bronteus*, *Harpes*, *Phacops*), en brachiopodes et en massifs de polypiers. C'est le facies *Hercynien* de l'étage, qui se prononce de plus en plus à l'est, pour acquérir tout son développement dans l'Oural méridional, avec les calcaires à *Hercynella bohemica* et à pentamères, supportant d'autres calcaires à *Anarcestes*. En revanche, en Pologne et en Podolie, on voit s'opérer le passage entre le grès à spirifères et les grès rouges à *Pteraspis* et *Coccosteus*, marquant le bord du continent russe. Les sédiments de ces deux facies s'entremêlent, et c'est cette association des poissons de l'*old red anglais* avec les mollusques du dévonien marin qui a permis de trancher la question, longtemps controversée, de l'âge du vieux grès rouge.

Massif armoricain. — Plus éloigné du continent boréal que l'Ardenne, le massif du Cotentin et de l'Armorique offre une

série dévonienne fort différente et exempte de conglomérats. Débutant par l'assise gédinnienne des *schistes et quartzites de Plougastel*, qui passent insensiblement au gothlandien, le dévonien inférieur continue par le *grès de Landévennec*, à *Orthis Monnieri*, après quoi, la sédimentation s'étant régularisée, dans les eaux devenues plus claires, il s'est formé un calcaire (celui de la rade de Brest), qui apparaît au milieu du schiste, étant caractérisé par le brachiopode *Athyris undata* et des trilobites, *Phacops*, *Cryphæus*. C'est ce calcaire à *Athyris undata*, en petits bancs mélangés de plaquettes schisteuses, qui se montre à Néhou (Manche), toujours superposé au grès à *Orthis* (grès de Gahard). Quelques apparitions sporadiques de grès micacés à *Orthis*, dans le massif d'Ecouves, montrent que le dévonien inférieur a dû occuper de grandes surfaces dans le massif armoricain-normand. C'est l'érosion qui l'a réduit à ne plus apparaître qu'en lambeaux, pincés dans les plis ou *synclinaux* du silurien supérieur.

Europe méridionale, Asie, régions arctiques. — Le type breton du dévonien inférieur a une grande extension; car on le retrouve, sans changement notable, et avec la même faune, dans les Asturies, en passant par les Pyrénées, et dans l'Aragon. Sans doute un bras de mer passait de la Bretagne à la péninsule ibérique, d'où, par la Méditerranée, la mer rejoignait les Alpes Carniques, sur l'emplacement desquelles le dévonien inférieur, franchement marin, montre à la fois, à la base le niveau à *Tornoceras* et, à son sommet, un calcaire semblable à celui de la Bohême.

Le facies hercynien se poursuit en Sibérie. On retrouve des gisements éodévoniens dans le Turkestan russe, la Chine et le Cachemire.

Quant aux régions arctiques, si bien baignées par la mer gothlandienne, le dévonien ne s'y montre que sous la forme du grès rouge.

Amérique, Afrique. — Le dévonien inférieur de l'Amérique du nord diffère assez de celui de l'Europe pour qu'il soit difficile de les paralléliser dans le détail. Commençant par un calcaire à pentamères, il continue par des grès et des schistes, avec brachiopodes des genres *Tropidoleptus* et *Leptocoelia*, très

particuliers à la faune américaine. Ces brachiopodes se retrouvent dans les territoires à l'ouest des Montagnes Rocheuses, et passent en Bolivie, au Brésil, dans la province de Matto-Grosso; enfin aux îles Malouines. Même on les retrouve en Afrique australe, au Cap, attestant que la mer qui venait d'Amérique léchait alors la pointe sud de l'Afrique.

Dans le nord du même continent, le coblentzien existe au Sahara, sous la forme de grès noirs et de grauwackes à *Homalonotus* et *Tropidoleptus*. Mais, dans l'intervalle, l'étage n'est pas connu.

§ 7

SYSTÈME DÉVONIEN

2° DÉVONIEN MOYEN OU SÉRIE MÉSODÉVONIENNE

Données générales sur le dévonien moyen. — L'époque du dévonien moyen est remarquable par l'extension que prend alors la mer sur une grande partie de l'hémisphère boréal. Cette extensien coïncide la plupart du temps avec un changement dans la sédimentation, qui de vaseuse tend à devenir calcaire. C'est alors que, pour la première fois en Europe, l'activité organique réussit à édifier de puissants massifs calcaires, aujourd'hui le plus souvent transformés en marbres.

La série mésodévonienne embrasse deux étages :

1° L'*Eifélien* (développé dans l'Eifel), se subdivisant en zone inférieure à *Anarcestes subnautilinus* et zone supérieure à *Agoniatites occultus*. C'est aussi, par excellence, l'étage de *Calceola sandalina*.

2° Le *Givétien* (de Givet), ensemble des zones à *Anarcestes Denkmanni* et *Meneceras Decheni*, également caractérisé par des brachiopodes très spéciaux, *Stringocephalus Burtini* et *Uncites gryphus*.

Ardenne. — Jusqu'au dévonien moyen, la mer s'était arrêtée en Ardenne contre une barrière silurienne qui la limitait au nord et coïncidait avec ce qui forme actuellement la crête du Condroz. Cette barrière est franchie dès le début

de l'eifélien, et les eaux marines couvrent alors un nouveau bassin, celui de Namur, en même temps qu'elles continuent à occuper la région de Dinant.

Le premier terme de l'étage, dans ce dernier district, est une grauvacke, parfois rouge et chargée de fer oligiste, à *Spirifer cultrijugatus*. Ensuite apparaissent des *schistes à calcéoles*, avec nodules calcaires, qui finissent par constituer, en certains points, comme à Couvin et à Trélon, des lentilles de calcaire compact dépassant 500 mètres d'épaisseur. *Phacops latifrons* est le trilobite le plus fréquent dans cette assise, remplacée dans le bassin de Namur, où la sédimentation est encore troublée, par le *poudingue* rouge de *Nannine*.

Le *givétien* ou calcaire de Givet est une assise de marbre en bancs réguliers, de 400 mètres d'épaisseur, où les stromatopores et les polypiers sont parfois associés à des gastropodes ainsi qu'aux stringocéphales. Du côté de Namur, l'étage est très réduit, et débute encore par un poudingue rouge, dit de Pairy-Bonny. Mais bientôt le calcaire y apparaît, parfois transformé en dolomies.

Eifel, Nassau, Bohême, Russie. — Bien développé dans l'Eifel, où l'assise à calcéoles supporte les calcaires à stringocéphales de Paffrath, connus pour leur richesse en fossiles, le dévonien moyen se poursuit dans le massif rhénan. Là, des schistes à *Spirifer cultrijugatus* supportent des couches marneuses à calcéoles, que surmonte le calcaire à stringocéphales; mais à ce dernier sont subordonnés, dans le Nassau, des épanchements de diabase, ainsi que des couches où le fer oligiste sert de gangue à des débris de crinoïdes.

Le facies, jusqu'alors si uniforme, du dévonien moyen, commence à se modifier dès le Nassau. La formation devient schisteuse (*schistes à tentaculites*, *schistes ardoisiers de Wissembach*) avec intercalations de calcaires à pentamères et à crinoïdes, que leurs goniatites ont permis de répartir entre l'eifélien et le givétien. C'est le facies dit *hercynien*, préparant par sa faune le dévonien de la Bohême. Dans ce pays, l'eifélien débute par un calcaire à crinoïdes, où apparaissent les premières goniatites connues en Bohême; puis vient un cal-

caire noduleux à trilobites et goniatites, que surmonte un givétien schisteux à stringocéphales.

En Pologne, l'eifélien inférieur est encore littoral : c'est un grès avec ossements de poissons, notamment de *Coccosteus*, qui se retrouve dans toutes les provinces baltiques. Mais l'invasion marine se prononce ensuite, amenant des calcaires à calcéoles et des dolomies. Sur une grande partie de la Russie, les calcaires givétiens à *Spirifer Anosoffi* alternent encore avec des grès ou des marnes à *Coccosteus*. Il faut aller dans l'Oural pour voir se fixer le facies franchement marin, dans les dolomies et les calcaires à stringocéphales de l'Oural méridional.

Europe occidentale. Régions méditerranéennes. — Le Boulonnais, comme le bassin de Namur, n'a été envahi par la mer qu'à l'époque eifélienne, de sorte que les schistes gothlandiens à graptolithes y supportent directement les schistes rouges et poudingues de Caffiers, équivalent probable du poudingue de Pairy-Bonny. Le caractère littoral de cette assise est affirmé par le grès à végétaux terrestres (*Lepidodendron*) qui la surmonte.

Là, comme au nord de Namur, la sédimentation calcaire a repris ensuite, en déposant le calcaire de Blacourt à *Spirigera concentrica*.

Il est probable que le dévonien moyen manque dans le nord de l'Angleterre, à moins qu'il ne soit représenté par la partie de l'*old red* qui renferme le poisson *Osteolepis*. Mais la formation existe dans le Devonshire et se retrouve en Bretagne, où la grauwacke du Fret et les schistes de Porsguen contiennent les fossiles de l'eifélien. Les calcaires de Montjean, de Chalonnes et de l'Ecochère appartiennent au givétien.

Représenté dans les Pyrénées, en Espagne et aux Baléares, mais sous une forme qui trahit le voisinage des côtes, le dévonien moyen est beaucoup plus pélagique dans les Alpes Carniques, où ses calcaires succèdent sans interruption à ceux des étages inférieurs. Enfin on en retrouve des traces sur le Bosphore.

Asie, Amérique, Afrique. — Assez étendu en Sibérie, où

sa faune offre des affinités à la fois avec celle de la Russie (dont la mer se reliait alors à la Sibérie par l'Oural et par le Nord) et avec l'Amérique du nord, le dévonien moyen, à stringocéphales ou à stromatopores, est connu au Tien Chan et au Kouenlun, de même qu'en divers points de la Chine et de l'Australie sud-orientale.

En Amérique du Nord, la **mer du dévonien** moyen s'étendait largement des Appalaches au Pacifique, laissant seulement subsister quelques îles. Sa faune a peu de rapports avec celle de l'Europe, si bien que, sans les goniatites, il serait assez difficile de reconnaître l'équivalence, avec l'eifélien et le givétien, du système formé par le *calcaire cornifère*, les *schistes de Marcellus* et les *schistes* d'*Hamilton.*

La première fougère arborescente d'Amérique a été trouvée dans le cornifère de l'Ohio, et les schistes d'Hamilton renferment les restes d'une flore terrestre à lépidodendrées, sigillaires et fougères, qui prépare l'avènement de la flore carboniférienne.

Deux brachiopodes, *Vitulina pustulosa et Tropidoleptus carinatus*, appartenant aux couches marines de l'assise d'Hamilton, sont caractéristiques du dévonien moyen de l'Amérique. On les retrouve au Brésil, en Bolivie et au Sahara. Mais, dans le Canada et l'Alaska, les affinités de la faune sont plutôt européennes.

§ 8

SYSTÈME DÉVONIEN

3° DÉVONIEN SUPÉRIEUR OU SÉRIE NÉODÉVONIENNE

Données générales sur le dévonien supérieur. — La géographie de l'époque néodévonienne paraît avoir peu différé, en Europe, de celle du dévonien moyen. Seulement, tandis que, à cette dernière époque, il y avait eu, en général, progrès continu de la sédimentation calcaire, l'inverse s'est produit avec le dévonien supérieur, presque partout terminé par un épisode schisteux ou arénacé, indice d'un mouvement du sol, favorable à la reprise de l'érosion.

Le premier étage, dit *frasnien* (à cause du calcaire de Frasne), voit apparaître un genre de goniatites, *Gephyroceras*, qui ne lui survivra pas. C'est la zone à *Gephyroceras* (*Manticoceras*) *intumescens*. Un brachiopode, *Rhynchonella cuboides*, en est également caractéristique.

Avec le second étage ou *famennien* (de la Famenne en Belgique) se montre une nouvelle famille d'ammonoïdés, exclusivement cantonnée à ce niveau, celle des *clyménies*, dont les lignes de sutures sont analogues à celles des goniatites, mais où le siphon est situé du côté interne. En fait de goniatites, le frasnien est la zone à *Parodoceras Verneuili.*

Un brachiopode très variable de forme, *Spirifer Verneuili*, caractérise tout le dévonien supérieur.

Ardenne, Eifel. — Le frasnien de l'Ardenne est un ensemble schisteux avec lentilles calcaires. Celle de Frasne a 600 mètres d'épaisseur. Parfois le calcaire est bigarré de rouge et de vert (rouge de Flandre, marbre de Fromelennes). L'étage se termine par des schistes noirs finement feuilletés.

Le famennien est tantôt purement schisteux (*schistes de la Famenne*), tantôt arénacé, sous forme de grès micacés ou *psammites du Condroz*. C'est dans ces psammites qu'apparaissent des fougères des genres *Archæopteris* et *Sphenopteris*, qu'on retrouvera dans la flore du carboniférien inférieur. Dans tous les cas, l'étage se termine par une assise de passage, parfois à l'état calcaire (calcaire d'Etrœungt), où les brachiopodes du dévonien supérieur coexistent avec des formes carbonifériennes.

Le frasnien de l'Eifel est calcarifère à la base et marno-schisteux en haut, où il contient *Goniatites* (*Aganides*) *retrorsus*. Il supporte un famennien schisteux où abonde un petit entomostracé, du genre *Cypridina* (*C. serratostriata*).

Europe orientale. — Plus à l'est, en Westphalie, les schistes à cypridines ne forment que le sommet d'une assise schisteuse à nodules calcaires, souvent enlevés par décalcification et produisant une roche trouée (*Kramenzel*), avec clyménies.

Les deux étages se poursuivent, à travers le Hartz et la Silésie, jusqu'en Pologne, où ils sont beaucoup plus calcaires,

et le facies calcaire domine exclusivement dans la Russie centrale. Mais les provinces baltiques laissent apercevoir, d'abord le mélange de formations marines avec des grès à poissons, ensuite, dès Saint-Pétersbourg, des grès rouges contenant les poissons de l'*old red* supérieur d'Écosse, c'est-à-dire les genres *Holoptychius*, *Pterichthys*, *Asterolepis*.

Au contraire, dans le dévonien supérieur de l'Oural, à l'état de calcaires marins, se développent les goniatites, *Gephyroceras intumescens* et *Aganides retrorsus*, et les clyménies. La mer était donc de ce côté, s'étendant loin dans l'est et le nord-est, mais n'atteignant pas le Donetz, où se trouvent à ce niveau des grès à flore terrestre.

Europe occidentale. — Il n'y a pas de doutes sur l'attribution au dévonien supérieur de la partie de l'*old red* écossais formée par les couches d'Elgin, puissantes de 600 mètres, avec poissons (*Holoptychius*, *Pterichthys*) et végétaux terrestres. En descendant au Sud, dans le Devonshire, on commence à retrouver les termes marins de la série ardennaise; et en Irlande, une couche gréseuse, celle de Kiltorkan, contient la flore du sommet des psammites du Condroz.

Dans le Boulonnais, le terme principal du frasnien est le calcaire de Ferques, abondant en brachiopodes (*Spirifer Verneuili*, *Productella subaculeata*). Mais le famennien ne laisse voir que des schistes rouges et verts, avec psammites rougeâtres contenant des mollusques acéphalés du genre *Cucullæa* (*C. Hardingii*). Si cette assise est encore marine, du moins elle s'est déposée à faible distance d'un rivage.

Certainement la mer du dévonien moyen s'est étendue sur plusieurs parties de la Bretagne. Dans la rade de Brest, la formation est représentée par des schistes à *Rhynchonella cuboïdes*, que surmontent les schistes de Rostellec à Cypridines et *Parodoceras Verneuili*. On doit aussi lui attribuer le calcaire de Cop-Choux, près d'Ancenis.

Europe méridionale. — Dans la Montagne Noire, des calcaires à goniatites ferrugineuses (*Aganides retrorsus*) supportent les *marbres griottes* à clyménies, bigarrés de rouge vif et de vert. et ramenant ainsi, dans le midi de la France, un facies déjà constaté dans l'Ardenne. Les griottes se retrouvent

dans les Corbières, et aussi dans les Pyrénées, où on doit leur rapporter la partie des marbres bigarrés de Campan qui contient des clyménies. Les mêmes circonstances se retrouvent aux Asturies et en Catalogne.

Dans les Alpes Carniques, le facies calcaire et pélagique persiste comme il avait fait dans les étages précédents; des calcaires à clyménies y surmontent les calcaires à *Rhynchonella cuboïdes*. Mais la Bohême devait alors être émergée, ce qui s'accorde avec la rencontre de végétaux terrestres dans la partie supérieure du dévonien moyen de cette région.

Asie, Afrique, Amérique. — L'horizon des clyménies se retrouve en Perse, et le dévonien supérieur est connu en un point de l'Hindou-Kouch, comme aussi dans les provinces chinoises du Yunnan et du Chansi. De là, par Okhotsk, la mer passait en Sibérie, où le dévonien supérieur est signalé aux environs de Verkhoiansk. On en retrouve les traces en Australie.

En Afrique, le sommet du grès noir du Sahara appartient au dévonien supérieur. Les goniatites de ce niveau se recueillent aussi au Gourara.

En Amérique, où la mer avait reculé à l'ouest des grands Lacs, les schistes bitumineux de Genesee contiennent des intercalations calcaires à *Rhynchonella cuboïdes* et *Gephyroceras intumescens*, tandis que l'assise schisteuse et gréseuse de Chemung renferme, au milieu de couches marines, des intercalations de grès avec végétaux, reproduisant les formes du Condroz. Le grès poreux pétrolifère de cette assise est par excellence l'horizon productif de Pennsylvanie, et sa base est un schiste avec restes nombreux de poissons ganoïdes.

Les grès rouges à fougères et à poissons de Catskill, dans le bassin de l'Hudson, sont, comme ceux de Kiltorkan en Irlande, un sédiment continental ou littoral, par lequel s'opère la transition à l'époque carboniférienne. En revanche, dans le Canada occidental et central, la formation reste marine et montre des affinités avec la Russie boréale. Seulement un continent devait exister entre la Russie et les terres arctiques américaines; car le grès de l'île des Ours contient la flore terrestre de Kiltorkan, et, sur la côte orientale du Groenland, par

73° 30′ de latitude, une puissante série de grès rouges renferme les *Holoptychius* et *Asterolepis* de l'*old red.*

§ 9

SYSTÈME CARBONIFÉRIEN
1° ÉTAGE DINANTIEN

Données générales sur le système carboniférien. Conditions du régime marin. — On peut dire que la période carboniférienne est celle pendant laquelle les masses continentales actuelles ont nettement commencé à s'individualiser. En même temps, dans les mers, il s'est constitué pour la première fois, sur des étendues notables, des assises calcaires d'une grande régularité. Les foraminifères, qui d'ordinaire exigent pour leur développement des eaux tranquilles, figurent parmi les plus actifs ouvriers de ces édifices calcaires, en association avec les échinodermes, les brachiopodes et les polypiers. De véritables craies à silex s'y montrent, aujourd'hui plus ou moins transformées en marbres, ainsi que des dolomies caverneuses.



Fig. 56. — *Productus Cora.*

Dans tout cet ensemble marin, la faune varie très peu de la base au sommet. Il n'y a presque plus de trilobites, sinon les genres *Phillipsia* et *Griffithides*. Parmi les brachiopodes domine le genre *Productus* (fig. 56) et, parmi les gastropodes, le genre *Euomphalus*. Les céphalopodes, en dehors de quelques goniatites et orthocères, sont peu nombreux. Au nombre des foraminifères abondent les *fusulines* (fig. 57).



Fig. 57. — *Fusulina cylindrica* (grossie).

L'uniformité de la faune est d'ailleurs aussi grande dans l'espace que dans le temps. Du Nebraska et du Brésil à l'Oural

et de là aux Indes néerlandaises, les mêmes types se rencontrent, attestant la similitude des conditions physiques.

Conditions du régime continental. — En même temps et par un remarquable contraste, des flores nombreuses et variées se succèdent à la surface des continents. Ceux-ci ont définitivement pris leur assiette et, dans l'hémisphère boréal, ils font si bien reculer les rivages maritimes qu'à la fin de la période, c'est à peine si quelques parties de ce qui forme aujourd'hui l'Europe et les États-Unis vont se trouver sous une mer ou plutôt sous des mers à peine dignes de ce nom par leur faible étendue.

Grâce à l'influence d'un climat tropical, *alors commun au globe entier*, et d'une atmosphère humide, chargée d'acide carbonique, une végétation extraordinairement puissante se développe sur la terre ferme. Presque exclusivement composée de types d'apparence cryptogamique, sans rien qui rappelle le jeu des saisons, cette végétation offre près du pôle arctique les mêmes formes que dans les latitudes tempérées et sous les tropiques. Les débris végétaux, très riches en principes gras, subissent, sous l'action des microorganismes, une transformation qui y fait dominer les matières ulmiques. Des pluies abondantes font ruisseler sur le sol des torrents d'eau, qui entraînent les débris des plantes avec ceux du terrain sous-jacent et vont stratifier le tout, dans de grands estuaires ou des lacs, en couches de conglomérats, de grès, de schistes argileux et de matières végétales décomposées. Ces dernières, désormais soustraites au contact de l'air, se compriment et deviennent de la *houille*. Ainsi se trouvera emmagasinée, pour les besoins à venir de l'industrie humaine, une notable partie de l'énergie lumineuse et calorifique dépensée par le soleil durant cette époque unique en son genre.

Tandis que ce phénomène se reproduit à maintes reprises, la flore, au lieu de rester stationnaire comme la faune marine, subit d'incessantes transformations, au point de fournir, pour la distinction des étages et même des zones, des indications d'une grande netteté. Sans doute l'atmosphère change, à mesure qu'elle se purifie par la perte d'une partie du carbone absorbé par les plantes et fixé dans les sédiments. Sans

doute aussi le relief et le climat se modifient, comme semble l'attester la venue tardive des *conifères*, dont l'apparition indique un sol plus sec et plus accidenté.

Flore houillère. — Dépourvue de *monocotylédones* (telles que les palmiers) ainsi que de *dicotylédones angiospermes* ou plantes à feuillage caduc, indices du jeu des saisons, la flore houillère abonde en végétaux d'apparence cryptogamique, avec une certaine proportion de *cycadées* et de *conifères.*



Fig. 58. — *Lepidodendron elegans.*

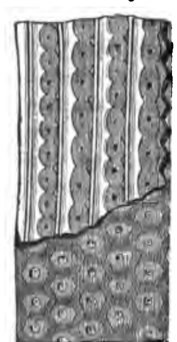


Fig. 59. — *Sigillaria elegans.*

Mais les cryptogames de l'époque houillère dépassaient singulièrement en grandeur leurs congénères actuels. C'étaient des *lycopodiacées* gigantesques, les *Lepidodendron* (fig. 58), et de grandes *Sigillaria* (fig. 59), formant des arbres de 30 à 40 mètres de hauteur, à feuillage maigre et piquant. C'étaient encore des fougères arborescentes (*Psaronius*) de 15 à 18 mètres, et des fougères herbacées, *Sphenopteris* (fig. 60), *Pecopteris* (fig. 61), etc., dont les frondes n'avaient pas moins de 10 mètres; enfin de grandes équisétacées, telles que *Calamites.*

Le caractère de cette végétation était la profusion plutôt que la richesse, la vigueur plutôt que la variété. Les fleurs vives et brillantes y faisaient défaut.

Ajoutons que la découverte récente des organes de fructification a permis de constater que la plupart des prétendues fougères carbonifériennes devaient être rattachées à la famille des gymnospermes, dans le voisinage des cycadées.

Vertébrés et insectes carbonifériens. — Jusqu'à l'époque houillère, les vertébrés n'étaient représentés que par des poissons. Avec le carboniférien apparaissent de nombreux *amphibies*, auxquels la structure particulière de leurs dents a fait donner le nom de *labyrinthodontes*. Mais il n'y a pas encore de reptiles à respiration purement aérienne.

Les trouvailles faites à Commentry ont montré que les *insectes* abondaient au milieu des forêts houillères. Quelques-uns étaient de taille gigantesque, atteignant *soixante-dix centimètres* d'envergure. La plupart appartenaient à des familles dont les représentants actuels fréquentent les lieux humides,



Fig. 60. — *Sphenopteris obtusiloba.* Fig. 61. — *Pecopteris arborescens.*

ce qui concorde bien avec le caractère surtout cryptogamique de la flore de l'époque.

Divisions du système carboniférien. — Le premier effort des continents pour prendre leur assiette s'est traduit, en Europe, par la formation de sillons orientés d'une façon générale de l'ouest à l'est, et dont le fond se tapissait de masses calcaires importantes, tandis que, sur les bords des massifs et des îlots émergés, se déposaient des conglomérats et des schistes. C'est l'époque *dinantienne*.

La faune marine ne comprend encore, en fait d'ammonoïdés, que des goniatites, et il en sera ainsi, du reste, pendant tout le carboniférien.

A la fin du dinantien, les bras de mer où s'étaient déposés les calcaires se transforment en grands estuaires, où par

En s'avançant vers le nord, c'est-à-dire vers l'ancien continent de schistes cristallins, on voit des sédiments arénacés s'introduire dans la série et, en Écosse, c'est par un *grès calcifère*, seulement moins rouge que l'*old red*, que débute l'étage. Puis, après une assise où le mélange de calcaire et d'argile donne de la pierre à ciment, on voit apparaître des schistes avec couches de houille, auxquels appartiennent les plus riches gisements houillers de l'Écosse. Ainsi, dans cette contrée, la formation du combustible minéral a eu lieu dès le dinantien. D'ailleurs elle s'est faite sur le bord de la mer, comme l'attestent plusieurs couches à *Productus* et à orthocères, qui alternent avec les veines de charbon.

De même, en Irlande, quand on va du nord au sud, on voit le facies du grès calcifère écossais faire place peu à peu à des schistes à faune marine, puis au calcaire carbonifère typique.

Boulonnais, Belgique. — Le *calcaire carbonifère*, faisant manifestement suite à celui d'Angleterre, affleure dans le Boulonnais, sous la forme de calcaires marbres à *Productus*, de couleurs variées. Cet affleurement, très disloqué, est l'origine d'une traînée qui se poursuit souterrainement, en s'élargissant, sous les terrains plus récents des environs d'Arras et de Douai, pour reparaître à la surface en Belgique.

Là, le calcaire carbonifère acquiert une grande importance. On y peut distinguer, de bas en haut : 1° les schistes calcaires de Tournai ; 2° le calcaire dit *petit granite* des Écaussines, entièrement formé d'une accumulation de fragments cristallins d'encrines, et pouvant être latéralement remplacé, comme à Waulsort, par de véritables récifs de polypiers ; 3° l'ensemble du marbre noir de Dinant et de la dolomie de Namur ; celle-ci remarquable par les escarpements ruiniformes, à structure caverneuse, qu'elle dessine sur les flancs de la vallée de la Meuse ; 4° le calcaire à *Productus giganteus* de Visé. Enfin il est des points où l'étage se termine par des bancs continus de phtanites.

Ainsi, pendant toute la durée du dinantien belge, les conditions ont été particulièrement favorables au travail des organismes constructeurs. Mais les vrais polypiers n'y ont joué qu'un rôle subordonné.

Westphalie, Saxe, Silésie. — La traînée dinantienne, un moment étranglée près d'Aix-la-Chapelle, passe sous le Limbourg et de là en Westphalie, où elle s'épanouit de nouveau, mais en subissant une transformation latérale; si bien que le calcaire est peu à peu remplacé par des schistes siliceux et alunifères à posidonies. C'est le facies du *Culm* qui se pro-

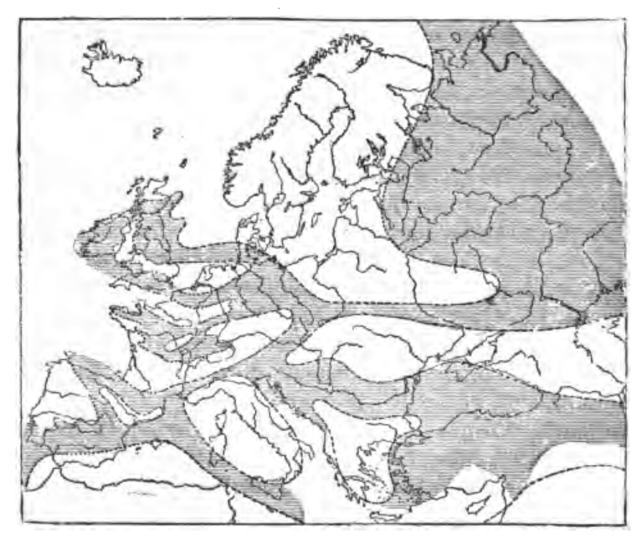


Fig. 62. — Esquisse de l'Europe à l'époque dinantienne.

nonce, pour prendre tout son développement dans la Hesse et le Nassau, où les schistes à posidonies sont mélangés de grès à flore terrestre, mais laissent voir, vers la base, quelques lits noduleux à goniatites.

Le même mélange se produit en Saxe, où, par exception, le dinantien contient une houille exploitable (Ebersdorf, Hainichen). Enfin c'est en Silésie que le Culm est le plus puissant. Son épaisseur s'y compte par plusieurs milliers de mètres. Divers horizons marins, à goniatites et posidonies, s'intercalent dans les conglomérats et grès à végétaux. Puis,

en Basse-Silésie, on y voit apparaître des lits calcaires à *Productus giganteus*, se développant de plus en plus du côté de Cracovie. Il s'agit donc bien d'un dépôt littoral, formé sur le bord méridional d'un bras de mer qui venait de la Westphalie.

Russie. — Bien que la communication de cette mer avec celle de la Russie ne soit pas connue, il est probable que les eaux européennes ont été en relation directe (fig. 62) avec la région du Donetz, où le dinantien, en concordance parfaite avec le dévonien, débute par des calcaires à *Productus semireticulatus* et *Productus giganteus*, pour finir par des grès et schistes, également marins, mais au milieu desquels apparaît une couche de houille. En allant vers le nord, on voit ce caractère s'accentuer dans le bassin de Moscou. Là, c'est l'assise à *Productus giganteus* qui renferme des couches de charbon, intercalées dans des grès à *Lepidodendron*. Enfin, dans l'Oural, les intercalations houillères sont à la base, surmontées par 1 500 mètres de calcaires fétides, à silex, avec *Productus giganteus*. Tout cela démontre que la mer dinantienne ne commençait à s'épanouir librement que dans l'est de l'Europe.

Cotentin, Vosges, Plateau Central. — Revenons maintenant à l'ouest. Nous y trouverons, dans le Cotentin comme auprès de Laval et à Châteaulin des vestiges de la pénétration de la mer dinantienne, sous forme de calcaires, soit à crinoïdes, soit à *Productus*. Mais cette mer devait être assez resserrée, et sur ses bords se formaient des sédiments grossiers, avec anthracite, contenant la flore du Culm. De plus, l'activité éruptive s'y est traduite par des tufs porphyriques.

Des circonstances analogues se sont produites dans les Vosges. Là, contre le bord d'un îlot ancien, se sont accumulées les couches d'une grauwacke abondante en tufs de porphyrite, et qui a fourni près de Thann de très beaux restes de la flore du Culm, tandis que, tout près, d'autres couches à *Productus* attestent la présence de la mer.

Cette mer baignait au moins une partie du Morvan, du Roannais et du Forez, où quelques lentilles de calcaire marin sont subordonnées à une puissante assise de schistes quart-

zeux et de grès avec anthracite (*grès anthracifère*), avec coulées de porphyre noir et tufs. Et comme cette traînée se prolonge jusque dans la Creuse, on peut penser qu'elle a été continue avec les gisements de la Basse-Loire. De la sorte, de la Bretagne aux Vosges, au lieu d'un bras de mer paisible, comme celui qui passait du pays de Galles à la Westphalie, il y aurait eu sédimentation littorale surtout détritique, et troublée par de nombreuses manifestations de l'activité interne.

Europe méridionale. — Les Alpes suisses devaient être émergées lors du dinantien et formaient une terre de schistes cristallins, dont les cailloux se retrouveront dans les gisements du westphalien. En revanche, la mer baignait le revers méridional de la Montagne-Noire, mais en respectant sur les Corbières une île contre laquelle se déposaient des conglomérats et des grès à végétaux

Quant aux Pyrénées, le dinantien marin s'y retrouve tout le long de la chaîne, affectant parfois le facies de griottes comme le dévonien supérieur. C'est aussi le cas dans les Asturies et la Catalogne. Plus au sud, dans la province de Huelva, ce sont les schistes à posidonies qui se sont appuyés contre la Meseta ibérique.

Les schistes à *Productus giganteus* se revoient dans les Alpes orientales et leur présence est soupçonnée en bordure du massif balkanique, dans l'intérieur duquel il y a des grès avec flore du Culm.

Asie, Afrique, Amérique. — De l'Oural, la mer dinantienne s'étendait sur la Sibérie occidentale et l'Altaï; mais, plus à l'est, son rivage septentrional n'atteignait pas le 60° parallèle, et déjà commençait à se constituer, dans le nord de l'Asie, un noyau continental destiné à une longue stabilité. C'est ce que M. Suess a appelé le *continent de l'Angara.*

En revanche, toute l'Asie centrale, le Tibet et la Chine étaient sous les eaux avec une partie de l'Australie. La mer asiatique se reliait, par l'Arménie et la Perse, avec celle de l'Europe, en déposant à Héraclée un calcaire à *Productus giganteus*, que surmonte la flore du Culm. Elle envoyait

ensuite sur l'Afrique un bras qui submergeait le Sahara septentrional et jetait jusqu'à Touat et à Igli, sur la frontière du Maroc, des fossiles de l'assise de Tournai.

A peu près exclusivement arénacé dans la région appalachienne (Pennsylvanie, Ohio, Michigan), le dinantien ou *subcarbonifère* est à l'état calcaire dans la vallée du Mississippi. La faune est assez différente de celle d'Europe, et comprend, en particulier, un curieux bryozoaire en forme d'hélice, *Archimedes*. Mais les goniatites permettent l'assimilation de ce *mississippien* avec le dinantien d'Europe.

La formation, toujours avec prédominance de l'élément calcaire, se poursuit sur la région des Montagnes Rocheuses et la Californie. On la revoit encore dans l'Alaska et l'Amérique arctique jusqu'à la terre de Grinnell. Mais le Groenland devait être émergé ainsi que le Spitzberg, où apparaît un grès à végétaux du Culm. Il est remarquable d'y retrouver les mêmes espèces qu'en Europe, sans que l'influence de la latitude s'y révèle en aucune manière, pas plus qu'elle ne se traduit sur les animaux marins du dinantien arctique.

§ 10

SYSTÈME CARBONIFÉRIEN
2° ÉTAGE WESTPHALIEN-MOSCOVIEN

Données générales sur l'étage. — En Europe, l'époque westphalienne a vu se produire le comblement progressif et enfin l'émersion des bras de mer où, lors du dinantien, les importantes assises du calcaire carbonifère s'étaient édifiées à la faveur d'eaux claires et tranquilles. Transformés en plis *synclinaux*, c'est-à-dire concaves, dont le fond s'abaissait à mesure que les bords se relevaient sous l'effort d'une poussée orogénique, ces bras de mer ont été comblés par les sédiments que leur apportaient les fleuves voisins, et auxquels se mêlaient les produits de décomposition d'une végétation exubérante, qui venait enfin de prendre son essor sur la terre ferme. Au début, la mer avait souvent accès dans les estuaires ou les lagunes, comme l'attestent plusieurs horizons de fos-

siles marins, alternant avec les couches de la première moitié du westphalien; mais dans la seconde moitié, ce sont des lits à mollusques saumâtres (*Anthracosia*, *Carbonicola*), qui seuls apparaissent au milieu des sédiments encaissant la houille.

Au moment où s'achevait ce comblement, dont l'effet avait été d'accumuler en certains points jusqu'à 3 000 mètres de dépôts, l'effort orogénique réussissait à chasser définitivement la mer et à faire surgir, depuis la pointe de l'Armorique jusqu'en Saxe, une ride ou plutôt une série de rides montagneuses, composant la chaîne *armoricaine-varisque* de M. Suess.

La flore westphalienne se distingue par l'abondance des *sigillaires*, associées aux *lépidodendrées*. Mais elle est surtout riche en fougères, *Sphenopteris*, *Mariopteris*, *Alethopteris* et *Nevropteris*. On y peut reconnaître trois zones; dans celle du milieu, la plus riche, le gymnosperme *Cordaites* devient commun. La zone supérieure contient déjà quelques espèces stéphaniennes de *Pecopteris* et d'*Annularia*.

Pendant que, sur la terre ferme, les conditions physiques subissaient les changements accusés par cette succession de flores, le régime de la mer du *moscovien* ou étage à *Spirifer mosquensis* demeurait assez uniforme, favorisant l'accumulation des foraminifères du genre *Fusulina*. La considération des goniatites permet de distinguer une zone inférieure à *Glyphioceras striolatum* et une seconde à *Gastrioceras Listeri*.

Angleterre. — En Angleterre, le changement du mode de sédimentation se traduit de suite par la superposition, au calcaire carbonifère, d'une assise de grès et de schistes, celle du *millstone grit* ou grès meulier. Il y avait alors une terre émergée, qui s'étendait de l'ouest à l'est, passant par les Malvern Hills. Des deux côtés de cette terre se sont déposés les sédiments du millstone grit; mais c'est sur le bord septentrional, dans la chaîne Pennine, que l'assise est le plus développée, atteignant 1 700 mètres de puissance. Quelques horizons de fossiles marins s'y rencontrent, ainsi que des plantes de la première zone westphalienne.

Au dépôt du grès a succédé celui du terrain houiller productif, dit *coal measures*, épais de 1 500 à 3 600 mètres, et formé de grès, de schistes, d'argiles et de minerais de fer

(*black band*), avec des veines de houille d'une épaisseur moyenne de 0 m. 60. La puissance totale de la houille exploitable varie dans chaque bassin de 15 à 25 mètres.

Dans la partie inférieure (série du *Gannister*), il y a plusieurs intercalations de lits à fossiles marins, notamment goniatites. Dans l'assise moyenne, les espèces saumâtres (*Anthracosia*, etc.) apparaissent, pour dominer presque exclusivement dans les *upper coal measures*, où souvent les grès prennent une coloration rouge. Un annélide, *Spirorbis carbonarius*, est caractéristique de ce niveau.

Ainsi s'accuse le comblement progressif des synclinaux. D'ailleurs, ceux-ci gagnaient peu à peu sur la bande émergée, si bien que, dans le Shropshire, le Staffordshire méridional et le Leicestershire, on voit le terrain houiller déborder ses premières limites et reposer directement sur le cambrien ou le silurien, sans intercalation de calcaire carbonifère. Parfois on constate que le westphalien moyen avait subi un certain plissement avant le dépôt des *upper measures* qui, à Shrewsbury, en arrivent à s'appuyer sans intermédiaire sur le dévonien.

Bande franco-belge. — La bande westphalienne qui s'étend à travers le nord de la France et de la Belgique se distingue par le moindre développement des grès et la plus grande finesse de leur grain.

A la base est une assise de schistes noirs alunifères, dits *ampélites de Chokier*, avec *Glyphioceras striolatum*. Puis viennent des schistes argileux et des psammites d'un gris noirâtre avec alternatives de fossiles marins et de végétaux terrestres. Une petite couche d'arkose y peut représenter le facies du *millstone grit*. L'ensemble a été distingué sous le nom de *namurien*.

Le terrain houiller productif, épais de 2 900 mètres à Mons, de 1 400 ou 1 500 mètres à Charleroi, peut offrir jusqu'à 40 mètres de charbon, en couches ne dépassant pas 1 m. 60. Comme en Angleterre, les lits de mollusques fossiles, au nombre de plus de 40, accusent une diminution progressive dans la salure des eaux. Les goniatites disparaissent dès le milieu de l'étage, cédant la place, d'abord aux *Carbonicola* puis aux *Naiadites*.

Ainsi le grand estuaire se comble peu à peu, et sa surface

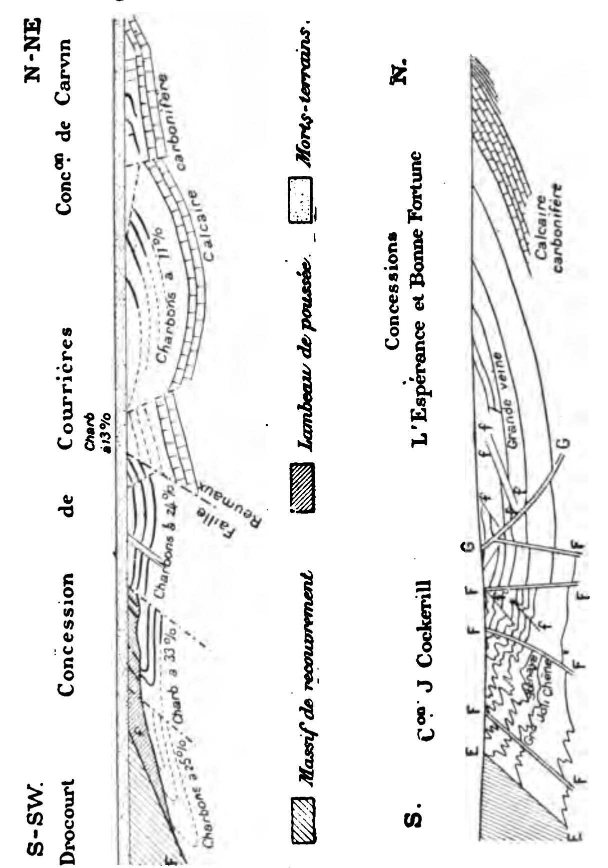


Fig. 63. — Coupe prise à travers la concession de Courrières (d'après MM. Fèvre et Cuvelette), faille du midi; *f*, faille des Plateures.

Fig. 64. — Coupe du bassin de Liège (d'après MM. Habets). E, E, faille eifélienne; F, F, grandes failles; G, faille Saint-Gilles; *f*, *f*, petites failles.

approche de plus en plus du niveau de la mer, qu'elle va tendre à dépasser.

On remarque aussi un changement ordonné dans la nature des houilles, changement qui va de pair avec la modification des flores, ce qui permet de distinguer, de bas en haut : 1° la zone des charbons maigres; 2° celle des charbons demi-gras; 3° la zone des charbons gras; 4° celle des *flénus* ou charbons à gaz, développée notamment dans le Pas-de-Calais (Bully-Grenay) ainsi qu'à Mons.

Le terrain houiller de la bande franco-belge a subi des bouleversements considérables, dont les figures 63 et 64 donnent une idée. Le trait principal de ces dislocations est une faille oblique, dite *Grande Faille* ou *Faille du Midi*, qui, au sud de la bande, fait chevaucher le dévonien par-dessus le westphalien plissé en zigzags. C'est l'effet de la poussée orogénique qui a mis fin à la période.

Par suite de cette poussée, une partie des sédiments houillers, qui se trouvaient au sud de l'emplacement aujourd'hui occupé par la grande faille, ont été entraînés au nord avec les terrains plus anciens sur lesquels ils reposaient. De cette manière, ce que l'exploitation atteint aujourd'hui, à partir des morts terrains, dans le Pas-de-Calais et le Nord, ce sont ces lambeaux entraînés, et souvent renversés, qui ont été ainsi jetés sur la *cuvette houillère* demeurée en place. Par exemple, à Anzin, celle-ci ne serait atteinte qu'à une profondeur d'environ 2000 mètres. L'accident qui sépare la partie en place de celle qui lui est superposée par charriage est ce qu'on nomme le *cran de retour*.

Westphalie, Limbourg, Silésie, Pologne. — Par Aix-la-Chapelle et le Limbourg, la bande houillère se prolonge en Westphalie, où elle atteint sur les bords de la Ruhr un développement remarquable. Beaucoup moins disloquée qu'en Belgique, et prenant sous les *morts-terrains* une extension considérable vers le nord, elle a de 2 000 à 3 000 mètres, et on y compte au moins 90 couches exploitables de houille, représentant plus de 80 mètres de charbon. Là aussi, les houilles maigres occupent la base, et les houilles flambantes à gaz le sommet.

Tout près d'Osnabrück, à une grande distance des affleurements méridionaux du westphalien de la Ruhr, une dislocation

amène au jour un faisceau houiller contenant la flore de Bully-Grenay. Cela donne à penser que le prolongement occidental du grand synclinal westphalien ne doit pas se borner au seul bassin d'Aix-la-Chapelle et de Liège. En effet, les sondages récemment exécutés dans le Limbourg hollandais et le Limbourg belge ont révélé l'existence en profondeur d'une bande houillère, aux couches presque horizontales, avec veines d'un charbon qui donne jusqu'à 40 0/0 de gaz. Cette bande, contournant l'ancien îlot du Brabant, passe près d'Anvers et va sans doute rejoindre les gisements du nord de l'Angleterre.

Après la Westphalie, il faut aller jusqu'en Silésie et en Pologne pour revoir un beau développement du westphalien. Dans la Basse-Silésie, les *couches de Schatzlar*, surmontant celles de *Waldenburg*, à cheval sur le westphalien et le dinantien, supportent les couches de *Schwadowitz*. On y compte 40 mètres de charbon en 36 couches.

Mais la plus grande richesse est concentrée dans le bassin de la Haute-Silésie et de la Moravie, sous forme de 104 couches donnant ensemble 154 mètres de charbon. Une couche atteint 16 mètres à elle seule. Le bassin se poursuit sur Cracovie et sur Dombrova.

Europe méridionale. — Le grand synclinal carboniférien de la Sambre et de la Meuse, dont nous venons d'étudier le prolongement oriental, était limité au sud par l'anticlinal de l'Ardenne, alors terre émergée. Mais au delà de cette terre, une autre dépression, qui peut-être aboutissait à l'est du côté de la Thuringe, s'était formée de façon à recevoir, à l'époque du westphalien supérieur, des dépôts d'eau douce ou saumâtre, qui constituent aujourd'hui l'assise de base du bassin houiller de la Sarre. Ces dépôts, dits *couches de Sarrebruck*, sont subordonnés à des grès, des conglomérats et des schistes de couleur rouge, avec tufs porphyriques.

La flore westphalienne, soit supérieure, soit inférieure, se montre dans plusieurs des petits bassins houillers de la Bretagne et de la Vendée. Dans les Alpes occidentales, il y a quelques gisements du même âge, toujours sans mélange d'éléments marins. Tout le massif des Alpes était alors terre

ferme et, contre son bord, au Piémont comme en Styrie, se déposaient des sédiments avec matières végétales, que le métamorphisme a transformées en graphite.

Il faut aller jusque dans les Asturies pour retrouver, au milieu de dépôts à flore westphalienne, des intercalations marines d'âge moscovien. Il est probable que la mer occupait alors une certaine surface dans les régions méditerranéennes. Mais les vestiges qu'elle a pu laisser sont encore mal connus, sauf en Espagne, près de Belmez.

Russie, Spitzberg, Asie. — Du Pays de Galles jusqu'en Silésie, la formation westphalienne s'est montrée très homogène. Un autre facies apparaît en Russie, préparé dès le bassin du Donetz. Là, plusieurs couches marines, à *Spirifer mosquensis*, alternent avec des grès et schistes qui contiennent quelques veines de houille à flore westphalienne.

Puis, au nord, l'étage devient exclusivement marin, réalisant le type du *moscovien*. Les calcaires sont souvent blancs, parfois même crayeux. *Spirifer mosquensis* y est associé à *Fusulina cylindrica*. La même chose a lieu dans l'Oural, où la faune seule distingue les calcaires moscoviens de ceux du dinantien. *Glyphioceras striolatum* s'y montre avec d'autres goniatites. C'est donc là qu'était la mer libre, sans doute en communication par le sud-ouest avec les estuaires de l'Europe occidentale.

La mer moscovienne atteignait le Spitzberg; puis, contournant la Sibérie, elle s'étendait sur l'Asie centrale et la Chine. Dans cette dernière contrée, les lits calcaires à fusulines alternent avec d'importants gisements de houille, contenant une flore westphalienne. Mais au sud, en Indo-Chine et à Sumatra, ce sont seulement les vestiges de la mer à *Spirifer mosquensis* qu'on observe. Cette mer méridionale paraît s'être étendue aussi sur le Cachemire et le Salt Range.

Amérique du Nord. — Le *pennsylvanien* des États-Unis forme l'exacte contre-partie du westphalien d'Europe, dont il reproduit par sa flore les diverses phases. Le même continent atlantique, qui touchait le bord occidental de l'Europe actuelle, s'étendait en Amérique jusqu'à l'emplacement des Appalaches. Un golfe profond et ramifié, limité à l'est et au

sud-est par cette terre appalachienne, au nord par le territoire archéen et cambrien des grands lacs, s'ouvrait assez largement sur une mer qui submergeait la plus grande partie de la région des Montagnes Rocheuses, se comportant à l'ouest des États-Unis comme la mer moscovienne à l'est de l'Europe. Dans ce golfe, dont le Mississippi marque à peu près l'axe, se sont entassés les sédiments houillers, logés surtout dans trois synclinaux; celui de l'est ou appalachien, s'étendant de la Pennsylvanie jusque dans l'Alabama; celui du centre, occupant l'aire comprise, au sud du lac Michigan, entre le Mississippi et l'Ohio, et séparé du premier par le pli saillant ou *anticlinal* de Cincinnati; enfin celui de l'ouest, s'étendant de l'Iowa à l'Arkansas.

Dans le synclinal appalachien, l'étage débute par le *conglomérat de Pottsville*, équivalent du millstone grit, et d'autant plus épais qu'on se rapproche de l'ancien rivage oriental du golfe. Les *coal-measures*, qui viennent ensuite et présentent les particularités connues en Europe, y compris les dislocations, se développent dans deux régions : l'une, limitée et isolée au cœur même des Appalaches, où le charbon est de l'anthracite. C'est la *région de l'anthracite*; l'autre, formant la grande bande houillère du pays, et divisible en deux assises : celle du bas ou *série d'Alleghany*, avec plusieurs couches de houille bitumineuse; celle du haut, ou *série de Conemaugh*, pauvre en charbon, avec la flore des *upper measures* d'Angleterre.

A plusieurs reprises, des lits à fossiles marins se montrent dans les deux séries. *Productus Cora*, *P. punctatus*, *Spirifer cameratus* et *Fusulina cylindrica* s'y rencontrent.

Le westphalien inférieur prend un développement exagéré dans l'Arkansas, où sa puissance atteint près de 2500 mètres. Plusieurs horizons marins y existent, contenant les genres de goniatites *Gastrioceras* et *Pronorites*. Les intercalations marines sont particulièrement remarquables dans le terrain houiller de l'Illinois et de l'Iowa, où elles montent plus haut et sont bien plus fréquentes qu'en Pennsylvanie, ce qui concorde avec la plus grande proximité de la mer occidentale, dont les calcaires, généralement à *Fusulina cylindrica*, affleu-

milieu de schistes abondants en restes végétaux qui sont ceux des couches d'Ottweiler. C'était donc bien là que se faisait le contact entre le régime continental et le régime marin.

La mer passait en Dalmatie et en Bosnie, et respectant le massif ancien de la Hongrie et des Balkans, revenait sur la Crimée, pour s'épanouir largement en Russie.

Russie, Spitzberg. — L'ouralien russe commence, dans le bassin du Donetz, avec les calcaires à *Fusulina Verneuili*, couronnant le système des couches exploitables du moscovien. Puis viennent d'autres calcaires à fusulines, avec des arkoses qui montrent que la terre ferme n'était pas bien loin. Près de Moscou, l'étage prend la forme de dolomies. Enfin, dans le voisinage de l'Oural, il est tout entier calcaire. Les fusulines allongées et renflées ont remplacé les formes cylindriques du moscovien et c'est là surtout qu'abonde *Schwagerina princeps*. Là aussi se rencontre *Gastrioceras Marianum*, accompagné de *Pronorites cyclolobus*.

De l'Oural, par le nord de la Russie, la mer passait sur l'île des Ours, déposant à la base un calcaire à fusulines, et par-dessus d'autres calcaires, à *Productus* et à *Spirifer*. Elle atteignait ensuite le Spitzberg, mais sans le dépasser beaucoup, témoins les grès et schistes à *Cordaites* de la baie de la Recherche.

Asie, Afrique, Australie. — Les traces de la mer ouralienne se retrouvent en Asie, sous forme de calcaires à fusulines et à *Productus*, dans le Tien-Chan, le Pamir, les monts Nan-Chan, l'Altaï mongol et le Kan-sou. Cette traînée septentrionale devait être séparée par une île chinoise d'une autre mer à fusulines venant de l'Afghanistan et s'étendant sur la Chine méridionale, où le bassin de Lo-ping contient à la fois des couches marines et des lits à végétaux westphaliens de type européen. Ces intercalations nous font présager la prochaine émersion de la Chine.

On revoit les calcaires à fusulines ou à *Schwagerina*, d'un côté à Vladivostock et au Japon, de l'autre en Birmanie, en Indo-Chine, à Sumatra. C'est probablement à cet étage qu'appartient en Inde la partie inférieure des *calcaires à Productus* et à fusulines allongées, superposés à un conglomérat avec

galets striés, que beaucoup d'auteurs regardent comme glaciaire, en le rapportant au premier.

Par la Perse, la mer ouralienne passait sur l'Asie Mineure, en Palestine, au Sinaï et dans le désert égyptien. On ne sait pas encore jusqu'où elle allait vers l'ouest. Mais la plus grande partie de l'Afrique était terre ferme; seulement la mer devait être peu éloignée du Zambèze et de l'Afrique australe, où la base du *grès de Karroo*, riche en *Glossopteris*, repose, comme l'ouralien de l'Inde, sur un conglomérat à galets striés. Les mêmes circonstances se reproduisent en Australie, dans la Nouvelle-Galles du Sud; mais là, des couches marines apparaissent, sans fusulines, du reste, et se poursuivent en Tasmanie. L'océan Pacifique occidental était alors à peu près constitué dans ses limites actuelles.

Amérique. — Le Stéphanien est représenté en Pennsylvanie par l'assise du *Monongahela*, débutant par la célèbre couche de houille de Pittsburgh, qui couvre, avec une régularité remarquable et une puissance variable entre 1 et 2 mètres, un territoire de près de 60 000 kilomètres carrés. Dans cette assise (*upper-coal-measures*), dont la flore est celle du stéphanien supérieur, plusieurs couches de calcaires à crinoïdes ou à *Productus* sont intercalées, attestant qu'en Amérique la formation du stéphanien, comme celle du westphalien, s'est poursuivie dans des estuaires plus largement ouverts qu'en Europe. Dans la région de l'anthracite, les couches du haut sont certainement stéphaniennes.

Le bassin de l'Illinois montre, dans ses *upper measures*, jusqu'à 13 intercalations marines à fusulines. Les mêmes calcaires existent dans l'Iowa, et quand on arrive dans l'Arkansas, on voit le caractère marin se prononcer encore davantage par l'apparition des goniatites de l'Oural, *Gastrioceras Marianum*, *Pronorites cyclolobus*. Le facies marin est tout à fait net dans le Kansas, où l'ouralien ne se compose que de calcaires à fusulines. C'est le *missourien* des géologues américains. *Spirifer cameratus* y accompagne *Athyris subtilita*. De rares veines de houille existent dans l'ouralien du Texas, du Nevada et du Nouveau Mexique, et l'étage se poursuit, sous sa forme marine à fusulines, jusqu'en Californie et en Colombie

britannique, d'où, par l'Alaska et le Pacifique, il va rejoindre le bassin du nord de la Chine.

D'autre part, le calcaire à fusulines se revoit au Guatemala, ainsi que près de l'embouchure du fleuve des Amazones. Mais la plus grande partie du Brésil était terre ferme, et la province de Rio Grande do Sul y présente le fait intéressant de l'association des *Lepidodendron* et *Stigmaria* avec le genre de fougères *Gangamopteris*, caractéristique de la flore australe à *Glossopteris*; de sorte qu'on peut penser que le Brésil méridional offrait, au moins par moments, un terrain de jonction entre les deux grandes provinces botaniques, celle du nord, à flore stéphanienne normale, et celle du sud, avec flore d'Australie et d'Afrique australe.

§ 12

MODE DE FORMATION DE LA HOUILLE

Composition de la houille. — La formation du combustible minéral est l'événement le plus caractéristique de la période carboniférienne. Bien que le même phénomème se soit reproduit à d'autres époques, jamais depuis lors il n'a affecté une pareille ampleur. Aussi convient-il de s'arrêter un instant sur les circonstances qui ont déterminé l'accumulation de ces réserves d'énergie naturelle, destinées à exercer une si grande influence sur le développement de nos civilisations.

La houille est un composé de carbone, d'hydrogène et d'oxygène avec une certaine quantité de matières étrangères (silice, potasse, soude, alumine, fer et soufre), formant, suisuivant les cas, de 2 à 10 0/0 de la masse.

La substance est franchement minérale, insoluble dans les hydrocarbures et n'offre en général, au premier aspect, aucune trace d'organisation. La composition moyenne est celle de la cellulose, qui aurait perdu une certaine proportion d'acide carbonique, de gaz des marais et d'eau. Il est donc évident que le charbon de terre dérive de l'altération d'une matière végétale, les éléments étrangers qu'il contient étant justement ceux qu'on trouve dans les cendres de toutes les plantes.

Aussi la première idée qui soit venue à l'esprit a-t-elle été d'assimiler la houille à la tourbe, et de la considérer comme le produit de la décomposition, opérée sous l'eau, d'une végétation herbacée. Plus tard, dans le sein de la terre, ce produit aurait éprouvé une transformation graduelle, capable de l'amener tour à tour à l'état de lignite, de houille et même d'anthracite.

Structure de la houille. — Cependant, par l'emploi du microscope, précédé par l'application de certains réactifs oxydants, on parvient à déceler dans la houille des cellules végétales, toujours plus ou moins comprimées. Même, dans le charbon des gisements du centre de la France, il arrive souvent qu'on puisse reconnaître, à l'œil nu, des troncs aplatis de fougères arborescentes ou d'autres arbres, des écorces et des feuilles de *Cordaites*, *Calamodendron*, etc. Par des observations de ce genre, on a réussi à établir[1] que chaque couche de houille était formée de résidus végétaux, à divers degrés de désorganisation, comprenant des tiges, des écorces, des rameaux, des feuilles, et que tous ces débris étaient *posés à plat*, se recouvrant les uns les autres, comme des matériaux qui ont flotté librement dans un liquide. Les éléments végétaux encore discernables sont noyés dans une substance amorphe, *humique* ou *ulmique*, semblable à celle qu'on obtient en soumettant, à l'action de la chaleur et de la pression, le sucre, l'amidon, les gommes et autres produits dérivés des végétaux; de sorte qu'il est naturel d'y voir le résultat de la décomposition complète d'organes végétaux semblables à ceux dont les restes sont demeurés reconnaissables. Par ces divers caractères, la houille ne saurait être assimilée à la tourbe. Nous savons d'ailleurs que celle-ci ne se forme en grand que dans la zone tempérée froide, tandis que les végétaux carbonifériens témoignent incontestablement d'un climat tropical.

Caractère sédimentaire de la houille. — D'autre part, la houille se présente en véritables couches, souvent d'une merveilleuse régularité, encadrées au milieu de strates argileuses

1. Grand'Eury, *Flore carbonifère de la Loire.*

et arénacées, dont l'origine sédimentaire ne peut faire l'objet d'aucun doute. Les schistes charbonneux dans lesquels le combustible est encaissé sont des argiles remplies de menus débris végétaux, et il y a bien des couches de houille qui, par leurs impuretés, établissent un passage graduel entre ces schistes dits *bitumineux* et le combustible minéral proprement dit.

Ces passages sont surtout fréquents dans les bassins lacustres du centre de la France. Les études faites à Commentry[1], où l'ampleur des exploitations à ciel ouvert offrait à l'observation des facilités exceptionnelles, ont montré que la houille de ces régions était une *alluvion végétale*, versée dans l'eau d'un lac par les eaux torrentielles qui dégradaient les pentes avoisinantes. Tandis que les galets et les graviers tombaient à la tête du talus de déjection, les matières argileuses étaient entraînées plus loin et les détritus végétaux plus loin encore, sous une moindre inclinaison. Les tiges, charriées lors de ces débâcles, tantôt se déposaient à plat, tantôt échouaient au milieu des graviers, dans toutes les positions possibles, même verticales. Ainsi s'explique l'abondance, au milieu de certains grès houillers, de tiges dressées de *Calamites* (fig. 65), ordinairement dépourvues de racines et de feuilles, qu'on avait autrefois considérées, mais le plus souvent à tort, comme des arbres ayant vécu à la place même où l'on observait leurs restes.

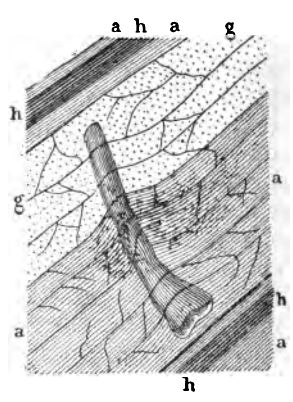


Fig. 65. — Tige fossile dans le terrain houiller d'Anzin. — a, argile schisteuse; g, grès; h, houille et schiste bitumineux.

Les couches de houille sont toujours superposées à des schistes argileux, jamais à des grès. C'est une raison de plus pour y voir le résultat d'une *préparation mécanique*, qui a

1. Par M. H. Fayol.

groupé au sein de l'eau, suivant leurs densités respectives, les matières entraînées par ruissellement. Cette préparation a été plus ou moins complète suivant la violence du régime des eaux et, de cette manière, tantôt les fines parcelles végétales sont restées intimement mélangées à l'argile, donnant de simples *schistes bitumineux*, tantôt la couche de débris végétaux partiellement décomposés, et bien séparés des matières terreuses, s'est régulièrement étalée avec une épaisseur uniforme, tantôt elle a formé, au milieu des sédiments vaseux, des amas inégaux, donnant naissance à des couches de houille en *chapelet*, c'est-à-dire pourvues de renflements et d'étranglements. D'autres fois, un apport violent de matériaux en aura recouvert un autre, de formation plus tranquille, et, à partir d'un certain point, les deux couches végétales se montreront appliquées l'une sur l'autre et confondues, tandis qu'en deçà elles seront séparées par un intervalle stérile, comme si une couche unique s'était dédoublée.

De cette manière, au lieu d'exiger pour sa formation un grand nombre d'années (comme on l'admettait dans l'hypothèse d'une végétation décomposée sur place), chaque couche de houille aurait pu être le produit d'une seule inondation, capable de déposer, à côté, plusieurs mètres de graviers et de vases. La transformation des végétaux en houille se serait faite avant le flottage, sous l'influence des microorganismes. La houille avait donc acquis, avant l'enfouissement, sa composition définitive, et depuis lors elle n'aurait subi, d'une façon normale, d'autres changements qu'une forte compression, accompagnée de dessiccation. Ainsi les différences que présentent les houilles, tantôt bitumineuses, tantôt sèches, proviendraient pour la plupart de la nature et de l'état de décomposition des débris végétaux ayant formé chaque couche, et le *grisou*, dont elles sont très inégalement chargées, résulterait du départ incomplet des gaz produits par la macération.

Du reste, la preuve que la formation de la houille n'a pas exigé les longs siècles qu'on admettait autrefois, c'est que certains bassins du centre de la France renferment, dans

leurs conglomérats, des *cailloux de houille* bien définie. La minéralisation des couches de débris végétaux était donc pleinement accomplie, à la base du bassin, quand les sédiments de la partie supérieure se sont formés.

Conditions des bassins maritimes. — L'hypothèse de la formation de la houille par flottage, qui explique toutes les particularités des bassins lacustres, et notamment le passage progressif de certains conglomérats à des couches de houille réglées, paraît devoir être étendue aussi aux gisements de la grande bande septentrionale européenne. En effet, dans ces derniers, le caractère sédimentaire des dépôts est encore mieux accusé, et les éléments des lits de charbon de terre sont les mêmes, quoique à un état de division plus avancé. Mais ce fait, joint à l'absence des conglomérats et même des grès grossiers, prouve seulement que les eaux étaient animées d'une moindre vitesse, et que le dépôt se faisait à une plus grande distance du lieu d'origine des matériaux. Cela se comprend sans peine, puisqu'il s'agit, non plus de ruissellements passagers sur les bords d'un lac, mais de masses d'eau débouchant dans la mer et y stratifiant leurs alluvions comme dans le delta d'un grand fleuve. On conçoit que ces alluvions, plus ou moins étalées par les vagues, aient acquis à la fois moins d'épaisseur et plus d'étendue; que les coquilles marines y soient de temps en temps présentes; que d'autres fois elles laissent la place à des mollusques d'eau saumâtre (*Anthracosia*, *Anthracomya*), analogues aux moules de rivière; enfin que jamais des fossiles terrestres ou d'eau douce ne soient associés aux couches de houille, ce qui n'aurait pas manqué de se produire, si la houille résultait de la transformation sur place d'une végétation tourbeuse. D'ailleurs, par le progrès naturel du delta dans une mer profonde, combiné avec un tassement graduel, les couches devaient finir par se superposer les unes aux autres en nombre considérable. Il n'est donc pas nécessaire, pour expliquer cette superposition, d'admettre une série indéfinie d'affaissements, hypothèse inconciliable, du reste, avec le fait dominant de la période houillère, qui est le gain progressif de la terre ferme sur la mer.

Ajoutons que si la plupart des couches de houille ont été formées par flottage, il n'est pas impossible que quelques-unes d'entre elles résultent de l'enfouissement d'une végétation de nature tropicale, établie à la surface des atterrissements d'un delta, pendant une émersion momentanée. Ainsi s'expliqueraient certains cas où l'on a cru reconnaître, avec certitude, la présence de racines en place dans les argiles servant immédiatement de base à la houille.

Idée générale du phénomène houiller. — Voici donc l'idée générale qu'il semble permis de se faire du phénomène houiller : sous l'influence d'une température chaude, d'une atmosphère humide et lourde, les continents fraîchement émergés étaient revêtus d'une végétation luxuriante, dont aucune intempérie ne venait jamais interrompre le développement. Le sol se garnissait, au fur et à mesure de la chute des branches et des tiges, d'une abondante couche de débris végétaux, les uns à peine altérés, d'autres presque totalement décomposés et laissant se dégager les principes gras et féculents dont ils étaient chargés. De temps à autre, des pluies violentes s'abattaient sur le sol, entraînant, soit à la mer, soit dans les dépressions lacustres, les arbres déracinés, les fougères arrachées, la couche de détritus ou de bouillie végétale qui en garnissait le pied et jusqu'au terrain lui-même. Une fois submergés, tous ces débris se séparaient par ordre de densités, les végétaux encore intacts se tenant toujours au sommet. Mais promptement enfouie sous un nouvel apport d'alluvions, la couche de détritus n'arrivait pas à la surface et achevait, à l'abri de l'air, sa transformation, consistant principalement dans sa dessiccation et l'acquisition d'une plus grande compacité. En même temps les végétaux non décomposés laissaient leur empreinte dans les alluvions argileuses qui venaient les recouvrir en les comprimant.

D'après cela, on comprend sans peine que les diverses couches de houille puissent être très inégalement riches en principes volatils et qu'il y ait des houilles *maigres*, très pauvres en produits bitumineux, et des houilles *grasses* qui en sont abondamment pourvues. Il suffit de se rappeler que les matières résineuses et grasses qu'on retire des feuilles don-

nent, par la chaleur et la pression, un produit analogue au bitume. Dès lors il n'est pas indifférent qu'une couche de houille soit constituée d'écorces plutôt que de feuilles, ni que telle famille végétale ait pris plus de part que telle autre à la formation de l'amas, ni enfin que la couche de détritus ait subi, avant son entraînement, une décomposition plus ou moins complète. Ce que les mineurs appellent le *fusain*, ou charbon mat tachant les doigts, si fréquent dans beaucoup de houilles, représente des fragments à demi pourris de tiges ou de rameaux, qui étaient tombés au milieu des écorces et des feuilles non encore décomposées.

Il convient de dire aussi que certaines houilles ont subi, par suite de la chaleur développée dans les mouvements du sol, une distillation partielle, qui a pu les priver de leurs principes volatils et les transformer en *anthracite.*

D'autres, très riches en matières volatiles, doivent leur composition spéciale à la part prépondérante que des algues d'eau douce, de la famille des *fleurs d'eau*, ont prise à leur formation. C'est par des débris d'algues de cette nature qu'est surtout constitué le *bog-head* ou charbon à gaz des schistes bitumineux de l'Autunois, lequel d'ailleurs appartient au permien.

Minerais de fer du terrain houiller. — Le *minerai de fer* se montre très souvent subordonné à la houille. En Angleterre et en Écosse, de nombreux lits de *fer carbonaté*, dit *black band*, alternent avec les schistes houillers. En Amérique, ce sont souvent des feuilles de fougères qui occupent le centre de rognons carbonatés, et tous les détails de la nervation y sont conservés avec une netteté merveilleuse. Le minerai exploité dans le bassin d'Alais, à Palmesalade, est aussi carbonaté et subordonné à une assise de grès et de poudingues, séparant deux faisceaux houillers.

Le fer carbonaté représente le premier état d'oxydation du fer. Il ne peut se produire que dans les milieux où dominent les influences réductrices, car la moindre oxydation le change en *limonite* ou peroxyde hydraté. La source des actions réductrices qui ont présidé à sa formation est d'ailleurs facile à reconnaître dans la masse de menus débris organiques con-

tenus au sein des schistes qui encaissent le carbonate. Par l'action de ces débris, suffisante pour absorber tout l'oxygène disponible, le fer de la houille est demeuré, tantôt à l'état de carbonate de protoxyde, tantôt à l'état de *pyrite* ou *bisulfure*, dont les lamelles, d'un jaune de laiton, brillent si souvent sur le fond noir de la plupart des houilles.

§ 13

SYSTÈME PERMIEN

1° ÉTAGE ARTINSKIEN-AUTUNIEN

Données générales sur la période permienne. — Les temps primaires se terminent par une période plus courte et aussi moins variée que les précédentes, mais où s'accomplissent deux faits paléontologiques de grande importance; le premier est l'apparition des *reptiles* terrestres, qui semble indiquer que les conditions atmosphériques nécessaires aux vertébrés à respiration aérienne étaient pour la première fois réalisées. Les principaux reptiles permiens, les *théromorphes*, sont à la fois très primitifs et assez complexes, leur squelette offrant des caractères mixtes qui tendraient à les faire rapprocher, d'un côté des amphibies, de l'autre des mammifères.

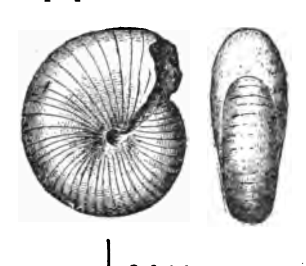


Fig. 66. — *Popanoceras Walcotti.*

Le second fait est la transformation que subissent les céphalopodes cloisonnés. Les cloisons des ammonoïdés perdent leur simplicité; et ce changement ne se borne pas à compliquer par quelques dentelures les sutures anguleuses des goniatites, comme *Popanoceras* (fig. 66). Pour la première fois se montrent des ammonoïdés à goulot siphonal dirigé en avant et à cloisons tout à fait persiliées, comme dans les vraies *ammonites*, par exemple *Waagenoceras* (fig. 67), *Cyclolobus*, *Medlicottia*. Par

ce caractère, le système permien se relie à l'ère secondaire; mais les trilobites, qui s'y éteignent avec le genre *Phillipsia*, le rattachent au groupe paléozoïque.

La flore permienne est, dans l'hémisphère boréal, la continuation appauvrie de la flore carboniférienne, avec expansion des conifères *Walchia*, *Ginkgo*, et de certaines fougères propres au système, des genres *Callipteris*, *Tæniopteris*. C'est à cette époque que s'accentue la différence entre la flore boréale et celle des terres indo-africaines, ou plutôt de la grande terre qui vient de s'individualiser sous les tropiques, depuis la longitude des Andes jusqu'à celle de l'Australie orientale. Là dominent les fougères *Glossopteris* et *Gangamopteris*. Mais les deux provinces offrent quelques points de contact.



Fig. 67. — Ligne de suture de *Waagenoceras Cumminsi*.

Divisions du système permien. — Le système permien est souvent qualifié de *pénéen* (à cause de sa pauvreté en fossiles), ou de *dyas*, parce qu'en Europe il se divise en deux groupes, l'un d'eau douce, l'autre marin ou saumâtre. En réalité le système comporte trois divisions : à la base, l'*artinskien* (du grès marin d'Artinsk) ayant pour équivalent occidental l'*autunien* (d'Autun), avec une flore très voisine de celle du stéphanien; au milieu le *penjabien* (du Penjab), correspondant au *saxonien* (grès rouge de la Saxe); enfin, au sommet, le *thuringien*, dont le terme caractéristique est le calcaire magnésien appelé *zechstein* en Thuringe.

Ces divisions sont justifiées par la considération des ammonoïdés. Ceux de l'étage inférieur, à *Medlicottia Orbignyana*, ont encore des affinités ouraliennes; dans l'étage moyen, à *Medlicottia Marcoui*, apparaissent nettement les vraies ammonites; enfin l'étage supérieur, à *Medlicottia primas*, montre des types encore plus avancés, destinés à prévaloir dans le système suivant, tels que *Xenodiscus* et *Sageceras*.

La flore comporte aussi trois phases; celle d'Autun, celle du du grès rouge proprement dit et celle du *zechstein*.

Europe occidentale. — Au début du permien, presque

toute l'Europe était émergée (fig. 68); mais les synclinaux qui avaient abrité les dépôts stéphaniens subsistaient, et même quelques-uns d'entre eux s'étaient agrandis.

La base du *nouveau grès rouge* en Angleterre, appartient-elle à l'autunien? La question n'est pas résolue, faute de fossiles. En revanche, cet étage apparaît en Normandie, près de Littry,

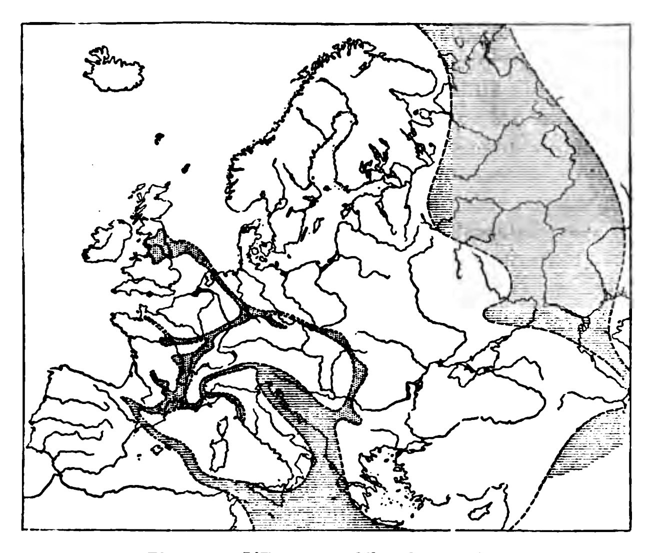


Fig. 68. — L'Europe au début du permien.

et peut-être aussi aux environs d'Ancenis. Il est bien développé dans le bassin de la Sarre, où la série des dépôts avec couches de charbon s'est poursuivie sans aucune interruption et sans discordance depuis le westphalien supérieur. Les *couches de Cusel*, avec la fougère caractéristique *Callipteris conferta*, inaugurent l'autunien de la Sarre, qui se termine par les *couches de Lebach*, connues pour leurs poissons, *Amblypterus*, *Palæoniscus* et pour les squelettes d'amphibies (*Archegosaurus*) qu'on y trouve dans des rognons de fer carbonaté, avec des débris de conifères (*Walchia*).

Très mélangé de porphyres, le grès rouge de l'Odenwald prolonge le permien de la Sarre et sert de jalon pour relier ce bassin, par les couches à *Callipteris conferta* du Hartz, avec la région où se déposaient les schistes bitumineux de Weissig en Saxe.

De petits bassins autuniens sont épars dans la chaîne des Vosges (Erlenbach, Trienbach). Des veines de charbon y accompagnent des conglomérats et des dolomies. Sur le revers français, la formation s'étage en nappes de grès et de conglomérats feldspathiques, de couleur violette, en association intime avec des épanchements porphyriques. Les tufs (argilolites) contiennent des troncs silicifiés de *Psaronius* et de *Cordaites*, qu'on revoit à Ronchamp à la base du permien.

La sédimentation a été beaucoup plus paisible dans l'Autunois, où l'on observe un beau développement de l'étage, logé dans un synclinal qui dépassait la Loire et l'Allier. Les *schistes bitumineux* de la région, très puissants, établissent par leur flore un passage continu au stéphanien. Le charbon à gaz ou *bog-head*, qui occupe le sommet de cette série, puissante de près de 1200 mètres, abonde en reste d'algues d'eau douce (*Pila*), analogues aux *fleurs d'eau* de nos étangs. Sa flore est riche en *Callipteris* et en *Walchia*.

Quelques calcaires magnésiens sont intercalés dans les schistes; mais ils ne contiennent que des fossiles d'eau douce.

Un autre bassin autunien est celui de Lodève, dont les schistes ardoisiers forment l'élément principal. La dépression où ils se sont déposés se prolongeait par l'Aveyron jusqu'à Brive, où les grès, rouges et gris, contiennent la flore usuelle de l'étage. Probablement cet ensemble de chenaux autuniens se versait au sud-est dans une mer méditerranéenne, dont un bras paraît avoir atteint les Pyrénées, car à Saint-Girons, on a signalé des schistes contenant, avec le trilobite *Phillipsia*, des ammonoïdés caractéristiques de l'artinskien.

Régions alpines. Russie. — Cette mer respectait les Alpes suisses et italiennes. Le permien y a revêtu la forme de conglomérats, avec schistes rouges et verts, qualifiés de *verrucano*, où les trois étages peuvent être représentés. En outre, on est aujourd'hui disposé à admettre que, dans la Vanoise comme

dans les massifs du Mont-Cenis et du Mont-Rose, et aussi dans les basses vallées piémontaises, il y a toute une série d'assises, actuellement transformées en gneiss et en micaschistes, qui établissent la transition entre le carboniférien et le permien supérieur.

En revanche, la région des Alpes orientales gardait le privilège, qu'elle avait eu aux époques précédentes, d'être baignée par la mer. Les calcaires blancs et rouges, à fusulines, de Tarvis, qui succèdent aux calcaires gris de l'ouralien, seraient un dépôt de cette mer artinskienne, qui n'a atteint ni le Banat ni la Serbie, où prévaut le facies du verrucano.

Le régime marin était assez franc en Russie, dans la région de Nijni-Novogorod, où des calcaires à fusulines et des dolomies surmontent l'ouralien. Dans l'Oural, le voisinage d'une côte se trahit par la nature arénacée des sédiments du *grès d'Artinsk* (*permocarbonifère* des géologues russes). Cette assise, accompagnée de calcaires et de marnes, se poursuit des steppes Kirghiz à la Nouvelle-Zemble et même au Spitzberg; on y trouve des ammonites à cloisons persiliées, telles que *Medlicottia*, avec les genres *Phillipsia*, *Productus*, *Fusulina*.

Asie. — La mer artinskienne s'arrêtait à l'Oural, et, dans l'Altaï, à Kouznetsk, l'étage n'est représenté que par des couches à *Callipteris conferta*. Mais, par le sud, la mer russe passait en Perse, arrosait le Turkestan, où le Darvaz a fourni quelques-uns des ammonoïdés d'Artinsk, la Dzoungarie, le Kouenlun occidental et l'Hindoukouch. Là elle n'était pas loin de sa limite méridionale; car au col de Bamian, les calcaires à fusulines alternent avec des couches à végétaux terrestres. Cette même mer a déposé dans le Salt Range les calcaires moyens à *Productus*, et ses restes se retrouvent dans l'Himalaya, sous la forme d'un calcaire blanc à *Phillipsia* et *Productus cancriniformis*.

Respectant le nord de la Chine, où l'étage est représenté par des sédiments à plantes terrestres avec lits de combustible, la mer baignait la Chine méridionale et la Birmanie.

Hindoustan, Indes orientales, Afrique, Brésil. — Tout autres étaient les conditions de la région située au sud de la mer dont nous venons de suivre les traces, région qui com-

prenait l'Afghanistan et la péninsule de l'Hindoustan. Là commençait à s'individualiser ce que M. Suess a appelé le *continent de Gondwana* (du nom d'une province indienne), lieu d'élection de la flore à *Glossopteris* et à *Gangamopteris*, contenue dans des schistes et grès avec couches de charbon.

La même flore caractérise les couches à charbon de *Newcastle*, dans la Nouvelle-Galles du Sud; et on la retrouve en Tasmanie, en Nouvelle-Zélande, et à Bornéo. Cependant des ammonoïdés permiens, recueillis à Timor, indiquent de ce côté le passage d'un bras reliant la mer himalayenne au Pacifique.

L'Afrique australe faisait partie du continent de Gondwana, et la formation des *grès de Karroo*, qui en est caractéristique, s'étend jusqu'à 10° Lat. Nord. Les *schistes de Kimberley*, avec intercalations de grès à *Gangamopteris*, y forment la base du permien.

En revanche, c'est la mer artinskienne qui devait, à ce moment, baigner le désert égyptien, passant sur le Sinaï et la Palestine pour rejoindre le bassin de la Perse.

Enfin on retrouve la flore à *Glossopteris* dans le sud du Brésil, mais avec un mélange d'espèces qui indique un point de contact de la province australe avec la province boréale à lycopodiacées.

Amérique du Nord. — La flore autunienne, représentée notamment par *Callipteris conferta*, existe en Pennsylvanie dans les couches dites de *Dunkard*, au-dessus de la couche stéphanienne de Pittsburgh. A l'ouest, dans l'Illinois, les sédiments deviennent de plus en plus rouges (*red beds*) et contiennent des ossements de reptiles théromorphes. Mais, dans le Kansas, la formation est essentiellement marine et composée de calcaires à *Pseudomonotis* et à *Phillipsia*. Dans le nord du Texas, ce sont encore des couches rouges ou *red beds* qui surmontent directement l'ouralien, et leurs vertébrés les désignent comme du permien inférieur. Mais, à l'ouest, dans les monts Guadalupe, la formation redevient franchement marine. Elle contient le genre *Phillipsia*, avec des fusulines allongées et divers fossiles rappelant les faunes artinskiennes de la Chine et des Alpes Carniques.

Sur l'emplacement des Montagnes Rocheuses a dû prévaloir un régime lagunaire, accusé par des couches rouges avec gypse. Mais le facies marin reparaît en Californie, amenant des céphalopodes du genre *Medlicottia.*

§ 14

SYSTÈME PERMIEN
2° ÉTAGE PENJABIEN-SAXONIEN

Europe occidentale. — Un régime analogue à celui de l'autunien persistait, lors du permien moyen ou saxonien, dans l'Europe septentrionale et occidentale. C'est alors que se sont formés en Angleterre les grès pourprés du Shropshire, couronnés par une puissante assise de brèche calcaire, dont les éléments sont empruntés à tout le paléozoïque. Des cailloux striés s'y rencontrent. L'*argilite* ou *marl slate,* qui termine l'étage, accuse par ses dépôts de gypse un phénomène d'évaporation, dans des lagunes aux bords fréquentés par des reptiles et peuplés de conifères du genre *Ullmannia.*

Le saxonien de la Sarre ou *grès rouge supérieur* est surtout formé de conglomérats, dont le dépôt a suivi les épanchements porphyriques et mélaphyriques de l'autunien. Du même âge est le grès rouge (*Rothliegendes*) de la Saxe, succession de conglomérats à galets porphyriques, de grès et d'argilolites, très développés à la fois en Thuringe et en Bavière. C'est sous le même facies que la formation apparaît auprès de Bade, dans la Forêt Noire et les Vosges. Partout se trahit l'activité éruptive qui se manifestait alors dans toutes ces régions.

Le grès rouge se poursuit souterrainement vers le nord, et les sondages l'atteignent, avec sa couleur caractéristique, dans le bassin de la Ruhr.

Des grès rouges, avec conglomérats, arkoses et schistes rouges, occupent les bassins de Blanzy et du Creusot. On les retrouve dans l'Aveyron, avec une flore qui se développe remarquablement dans les schistes gréseux supérieurs aux ardoises de Lodève, et connus pour la belle conservation des empreintes de *Walchia.*

Des conglomérats rougeâtres, avec argilolites, existent dans les Pyrénées et en divers points de l'Espagne. On les revoit dans les Maures et l'Esterel, associés, comme dans la Forêt Noire, avec des porphyres et des mélaphyres. La persistance de ce facies sur de telles étendues est des plus remarquables. Du reste, le *verrucano* des Alpes n'en diffère que par un métamorphisme qui va de pair avec les dislocations de la région.

Alpes orientales, Sicile. — Aux environs de Tarvis et de Sexten, on voit naître le facies du verrucano au-dessus d'une brèche à ciment rouge, contenant des fusulines. Un grès rouge à flore saxonienne, le *grès de Gröden*, en fait partie.

La brèche dont nous venons de parler fait présumer que les régions méditerranéennes devaient encore être accessibles au régime marin, En effet, près de Palerme, on a découvert des pointements d'un calcaire à crinoïdes et à fusulines, riche en ammonoïdés, dont plusieurs à cloisons persiliées, formant un ensemble qui paraît un peu plus récent que l'artinskien. Un trilobite, *Phillipsia sicula*, est associé aux ammonoïdés à cloisons différenciées, *Waagenoceras*.

Russie, Spitzberg. — Cette mer sicilienne devait être en relation lointaine avec celle de la Russie orientale, où l'*étage de Kostroma* se développait dans des conditions beaucoup moins franchement pélagiques. Tantôt c'est un calcaire à *Productus Cancrini*, mais sans fusulines, tantôt ce sont des marnes rouges à *Carbonicola*, avec gypse. Ainsi, dans cette région si longtemps occupée par la mer, le facies lagunaire commençait à s'introduire, amenant des formes de mollusques identiques avec celles du grès rouge de l'Europe centrale.

Plus au nord, sur la Petchora, c'est une formation à plantes terrestres qui apparaît à ce niveau, mais avec des types végétaux se rapprochant plutôt de ceux de la flore de l'Hindoustan.

Enfin, au Spitzberg, l'étage est marin; mais sa faune, où se remarque le mollusque *Pseudomonotis*, s'éloigne à la fois du type russe et du type indien, comme s'il se constituait à ce moment une province boréale, qui sera mieux marquée au début de l'ère secondaire.

Asie, Afrique, Amérique. — On n'a pas encore de preuves directes de l'extension vers l'Asie de la mer à fusulines de la Sicile. Cependant cette extension ne fait guère de doute, quand on revoit au Salt Range les calcaires supérieurs à *Productus*, se poursuivant jusqu'en Birmanie.

D'ailleurs, comme aux époques précédentes, la mer n'empiétait pas sur le continent méridional de Gondwana, où se déposaient les couches à charbon de Barakhar, avec *Glossopteris* et *Gangamopteris*. Les mêmes fougères se retrouvent en Afrique australe, dans la partie de la série de Karroo qui forme l'assise de Beaufort, et qui contient aussi des gisements de combustibles, avec restes de poissons (*Palæoniscus*).

L'Amérique du Nord laisse apparaître, dans la Nouvelle-Écosse, un grès rouge de type saxonien, avec la flore à *Walchia* de l'étage. D'autre part, les *red beds* continuent à se développer à l'ouest, dans le Texas et le Kansas, mais avec intercalations de couches marines à *Waagenoceras* et *Medlicottia*, qui s'observent au milieu d'assises saumâtres à *Cythere* et de lits à plantes terrestres, *Callipteris conferta* et *Walchia*. Il y a donc progrès manifeste dans l'émersion des régions qu'avait baignées la mer ouralienne, et cette émersion se fait, non par suite d'un phénomène orogénique local, mais par un lent retrait de la mer, laissant subsister des lagunes d'évaporation.

§ 15

SYSTÈME PERMIEN
3° ÉTAGE THURINGIEN

Données générales sur l'étage thuringien. — Le fait capital de l'époque thuringienne est le retour de la mer sur le nord de l'Europe. A la vérité, ce n'est pas un régime marin bien franc qui s'y établit. Les ammonoïdés font défaut, les fossiles sont peu nombreux et représentés surtout par des types atrophiés, de petite taille, comme si la mer avait présenté des conditions défavorables à la vie organique, par exemple un excès de salure, attesté d'ailleurs par les

fleuves qui devaient venir de l'est. Là se développaient donc, lors du permien supérieur, une faune et une flore semblables à celles du continent de Gondwana. L'aire de dispersion de ces organismes avait son centre aux environs d'Irkoutsk, dans ce *continent de l'Angara*, comme l'a appelé M. Suess, qui s'était définitivement constitué après le carboniférien, et devait résister depuis lors à toute submersion. Sans doute un assèchement ou un rétrécissement momentané de la mer qui passait d'Europe en Asie centrale avait permis, lors du thuringien, le mélange de la flore de Gondwana, développée en Afghanistan, comme nous l'avons vu, avec celle de l'Angara.

Régions méditerranéennes. — Lorsqu'on voit, dans les Alpes, le trias en concordance aussi parfaite avec le permien, on ne peut guère douter que le thuringien n'ait sa représentation dans les assises supérieures du *verrucano*.

Du reste, à Fünfkirchen, en Hongrie, les conglomérats porphyriques de ce verrucano sont surmontés par des schistes contenant la flore des schistes cuivreux du Mansfeld. Et cette même flore se trouve au Tyrol méridional dans le grès de Gröden. Or, dans le Frioul et les Alpes Carniques comme au Tyrol, ce grès supporte une puissante assise calcaire dite *calcaire à Bellérophons*, à cause du genre de mollusques qui la caractérise, et qui se trouve associé à une fusuline ainsi qu'à des fossiles du zechstein, dont le calcaire est évidemment l'équivalent.

Près de Sexten, l'assise en question renferme des orthocères et des ammonoïdés. On la retrouve d'ailleurs en Bosnie, et ainsi on est fondé à penser que l'Europe centrale, alors émergée, séparait la mer thuringienne du Nord d'une autre mer méditerranéenne, bien plus franchement pélagique, qui continuait dans ces latitudes le régime des précédents étages.

Asie, Afrique, Amérique. — Le prolongement de cette mer est connu en Arménie, au Darvaz, dans l'Himalaya, et au Salt Range, où le terme supérieur des *calcaires à Productus*, avec nombreux ammonoïdés des genres *Medlicottia*, *Cyclolobus*, *Sageceras*, paraît devoir être attribué au thuringien.

Dans la terre de Gondwana, c'est l'*assise de Panchet*, ou du

moins sa base, qui correspond à l'étage. Avec des labyrinthodontes, on y trouve les premiers reptiles *dicynodontes*, qui apparaissent aussi au sommet de l'assise de *Beaufort*, dans le Karroo africain. Du reste, ces dernières couches renferment des mollusques saumâtres, du genre *Palæomutela*, identiques avec ceux du permien supérieur de la Russie ; nouvelle preuve de la frappante similitude des conditions qui devaient régner alors dans ces deux régions, malgré une différence en latitude de 90 degrés.

En Amérique, la partie supérieure des *red beds* du Texas, du Kansas et de l'Oklahoma contient des fossiles marins, *Schizodus*, *Pleurophorus*, *Bakewellia*, qui font pencher la balance en faveur du thuringien. On retrouve ces espèces dans l'Utah. D'ailleurs ces couches rouges sont fréquemment gypsifères. Ainsi se préparait l'émersion définitive de la contrée.

§ 16

ÉRUPTIONS DE L'ÈRE PRIMAIRE

Caractères généraux des éruptions primaires. — Pendant toute la durée de l'ère primaire, l'activité interne paraît s'être donné carrière par une série en quelque sorte continue de manifestations. Tantôt les roches éruptives sont arrivées jusqu'à la surface de l'écorce, s'épanchant en nappes sous-marines, ou même en coulées à l'air libre, accompagnées de projections et de tufs, dont quelques-uns peuvent être d'anciennes cinérites ; tantôt elles ont traversé, en filons plus ou moins puissants, une épaisse série de terrains ; tantôt enfin elles se sont bornées à remplir des dômes de soulèvement, se logeant dans l'axe de *plis anticlinaux*, c'est-à-dire de voûtes allongées, sans parvenir jusqu'au jour.

Dans les pays depuis très longtemps émergés, comme la Bretagne et surtout le Plateau Central, l'érosion, poursuivie pendant une suite incalculable de siècles, a fini par mettre à découvert ces roches de cristallisation profonde, qui sont généralement des *granites*, en faisant disparaître la tête des

plis qui les recouvraient. Mais ce travail n'a pu se poursuivre sans amener la destruction d'une grande épaisseur de roches de surface, parmi lesquelles, peut-être, se trouvait plus d'une coulée éruptive, dont toute trace aurait ainsi disparu, si l'on n'en retrouvait parfois quelques vestiges parmi les conglomérats formés aux époques géologiques qui ont vu s'accomplir ces destructions.

D'autre part, il est des régions, comme le Trégorrois, l'île de Jersey, le pays de Galles, etc., où l'on peut encore observer, en place, des roches très anciennes d'épanchement superficiel et même des tufs, ainsi que des produits de projection datant presque de l'aurore des temps sédimentaires.

Nous nous bornerons ici à mentionner quelques-uns des principaux types éruptifs de l'Europe occidentale, en les rapportant, autant que possible, aux périodes pendant lesquelles a dû avoir lieu la sortie des roches.

Éruptions précambriennes. — Des roches éruptives d'âge précambrien s'observent dans le nord du pays de Galles, sous la forme de *porphyres pétrosiliceux* ou *rhyolites*, en coulées au milieu des schistes du système. Ces porphyres se retrouvent en cailloux roulés, dans le conglomérat cambrien qui sert de base aux ardoises violettes de Llanberis, de telle sorte que l'âge des éruptions ne peut faire l'objet d'aucun doute.

Un centre encore plus important existe dans l'île de Jersey. Là encore, un conglomérat, de l'âge du poudingue pourpré du Cotentin, renferme des galets des roches éruptives qui traversent les phyllades sous-jacents. Mais la série en est bien plus variée; car elle comprend du *granite* proprement dit, du *granite à amphibole* et de la *syénite*, des *diorites*, de la *pegmatite*, en fait de roches de profondeur; puis, formant des nappes et des filons, des *porphyrites*, des *porphyres pétrosiliceux* et des *granulophyres*, accompagnés de brèches et de tufs de projection.

Une série très analogue existe sur la côte de Bretagne, dans le Trégorrois.

Les phyllades précambriens des environs de Granville renferment des galets d'un *granite* commun, identique avec celui des îles Chausey. Enfin, dans les phyllades du Cotentin, le

granite dit de Vire a été injecté en longues bandes, avant la formation des poudingues pourprés. Cette injection a déterminé, dans les schistes encaissants, un métamorphisme qui en a fait des *schistes maclifères*, par développement de petits noyaux et même de cristaux de *macle*. Des faits analogues ont été observés en Alsace et dans bien d'autres contrées.

Éruptions siluriennes. — Le nord du pays de Galles, et spécialement la région du Snowdon, offrent d'incontestables exemples d'éruptions d'âge silurien, représentées par des *porphyres*, des *porphyrites* et des *tufs*, même des *cinérites*, qu'on trouve intercalés au milieu du silurien moyen.

En Bretagne, les assises de l'ordovicien supérieur, dans la baie de Douarnenez, présentent de fréquentes intercalations de *diabases*, accompagnées de brèches et de *tufs de projection*. Il est probable qu'il convient de rapprocher de ces nappes les grands filons de la même roche qui traversent le précambrien du Cotentin, et qu'on suit parfois sur plus de 12 kilomètres. La roche, d'un vert foncé, est compacte et fournit des matériaux recherchés pour l'empierrement.

Ce sont aussi des *diabases*, en nappes régulières, qui alternent en Bohême avec les premiers sédiments du silurien supérieur, ceux qui contiennent des graptolithes.

Éruptions dévoniennes et carbonifériennes. — Parmi les éruptions dont l'âge dévonien est incontestable, on peut citer les coulées de *diabases*, avec *tufs*, qu'on observe dans le Nassau et le Hartz. Il est probable que beaucoup de *pegmatites* et de *granulites à tourmaline*, comme celles de Cornouailles en Angleterre et du mont Saint-Michel en France, datent de la même époque, bien que leur formation ait pu se poursuivre jusqu'au début de la période carboniférienne. C'est à cette dernière phase que doivent être rapportés la plupart des *porphyres quartzifères* ou *granophyres* de France, notamment ceux de la rade de Brest (dont l'éruption a été presque immédiatement suivie par la sortie de filons de *Kersanton*), et les porphyres du Morvan, ainsi que ceux du Plateau Central; car toutes ces roches se retrouvent en galets dans les conglomérats du terrain houiller supérieur.

Quant au *granite* de Flamanville, qui certainement a méta-

morphosé le dévonien du Cotentin, son éruption date, ou du dévonien supérieur, ou du carboniférien.

Les granites postérieurs au silurien abondent en Bretagne. C'est ainsi que les schistes siluriens à calymènes des Salles de Rohan ont été changés en *schistes maclifères*, contenant de très grands cristaux de macle, par l'influence de massifs granitiques ou granulitiques voisins. Un autre de ces massifs a fait subir le même métamorphisme aux schistes carbonifériens des environs de Carhaix. Le granite qui a produit cette action, celui de Rostrenen, est remarquable par la dimension extraordinaire de ses cristaux de feldspath. Du même âge est le beau granite porphyroïde du Huelgoat, qui forme de si pittoresques amoncellements de rochers.

Les *pegmatites* et les *granulites* jouent un rôle important dans le Limousin et le Plateau Central de la France. Ces mêmes roches sont très développées en Angleterre, dans le pays de Cornouailles, où leur fréquente association avec des minerais d'étain leur a fait donner le nom de *granite à étain*. Ce qui distingue ces roches granulitiques, en général dévoniennes ou dinantiennes, c'est, avec la présence fréquente de la *tourmaline* (silicate d'alumine avec acide borique), l'abondance du mica blanc argentin et la présence de minéraux contenant du fluor.

Aux époques dont il vient d'être question, il devait y avoir de vrais appareils volcaniques, dont les projections engendraient des tufs, tels que les *tufs porphyritiques* du Morvan, subordonnés à la base du carboniférien.

Enfin la période houillère a été souvent marquée par la sortie de *porphyres globulaires* et par celle de roches basiques ou neutres, à texture compacte, de teinte verte foncée, connues sous le nom générique de *trapps*. Beaucoup de ces trapps sont des *porphyrites* riches en mica. Quelques-uns sont accompagnés de *tufs* qui ont beaucoup d'analogie avec les *cinérites*.

Éruptions permiennes. — Les éruptions ont continué à l'époque permienne. Seulement nous ne connaissons pas, avec certitude, de roches granitiques datant de cette époque. Même les *porphyres*, qui forment des coulées très nettes, par-

fois divisées en prismes, y sont le plus souvent *pétrosiliceux*. Leur sortie a été parfois accompagnée de celle de roches tout à fait vitreuses, comme les *pechsteins* de la Saxe et ceux du Var, ou bien de roches à globules, dites *pyromérides*.

On a la preuve que de nombreuses manifestations thermales et solfatariennes se sont produites lors du permien inférieur. C'est à cette cause que doit être attribuée la formation des *tufs* argileux violets ou *argilolites* du val d'Ajol, dans les Vosges, tufs à demi sédimentaires, qui contiennent de nombreux restes silicifiés de végétaux, et à côté desquels on observe de grands filons de quartz, tous plus ou moins métallifères.

Les roches basiques de l'époque permienne, notamment les *mélaphyres*, abondent dans le Palatinat; ces roches se rapprochent à bien des égards des basaltes actuels. Plusieurs sont vacuolaires et leurs cavités ont été remplies par divers minéraux, tels que l'agate.

Résumé. — En résumé, l'activité éruptive paraît avoir été à peu près continue pendant toute la durée des temps primaires. D'une manière générale, au moins jusqu'à l'époque houillère, les roches acides semblent prédominer. Leur position est d'ailleurs assez caractéristique. Les granites forment, comme nous l'avons déjà dit, de larges traînées, occupant le plus souvent l'axe de plis convexes ou *anticlinaux*. Ils ont donc dû se solidifier dans la profondeur, sous une pression qui maintenait les dissolvants et à l'abri de toute rapide déperdition de la température. A ces circonstances devraient être attribués, d'abord l'état si cristallin des granites, ensuite l'influence qu'ils ont exercée sur les roches voisines, en y faisant pénétrer peu à peu les gaz et les vapeurs répandus dans leur masse.

Loin d'avoir forcé l'entrée des terrains encaissants en les disloquant, les granites et les roches analogues semblent y avoir troué leur chemin en les *corrodant*, en quelque sorte, à la manière d'un acide. On peut dire, du reste, que toutes les roches éruptives ont joué, dans les dislocations, un rôle passif, profitant, pour s'y injecter, des cassures ou des rides produites par des phénomènes mécaniques dont les éruptions étaient généralement la conséquence et non la cause.

litic) cet ensemble caractérisé par ses couleurs bariolées. Au-dessus vient le système *jurassique*, dont le type a été pris dans les monts Jura. L'abondance des fossiles et les ressources que fournit, pour une classification détaillée et cependant d'application universelle, la considération des ammonites, ont permis de diviser ce système en un assez grand nombre d'étages, qu'on groupe habituellement à plusieurs en trois séries : la série *éojurassique* (ou *infrajurassique*), appelée aussi série *liasique*, du nom usuel d'une des assises qui la caractérisent en Angleterre; la série *mésojurassique*, enfin la série *néojurassique*[1].

Enfin l'ère secondaire se termine avec le système *crétacé* ou *crétacique*, dans lequel nous distinguerons seulement deux séries d'étages; la série *éocrétacique* et la série *néocrétacique*[2].

§ 2

SYSTÈME TRIASIQUE

1° SÉRIE ÉOTRIASIQUE OU ÉTAGE WERFÉNIEN

Données générales sur le système triasique. — Le système triasique tire son nom de la division habituelle en trois termes (*trias*) qu'il présente dans la région classique de la Franconie, où il a été pour la première fois défini.

Au début de la période, les mers intérieures qui couvraient une partie de l'Europe septentrionale se sont asséchées; mais une mer largement ouverte occupe l'emplacement du bassin de la Méditerranée et ne tarde pas à envoyer vers le nord des bras qui, par moments, arrivent jusqu'au pied de l'Ardenne et du Hunsrück. Toujours restreintes dans l'ouest de l'Europe, où elles n'atteignent pas l'Angleterre, ces invasions marines deviennent la règle dans la région orientale. Aussi cette dernière est-elle le théâtre d'une active formation

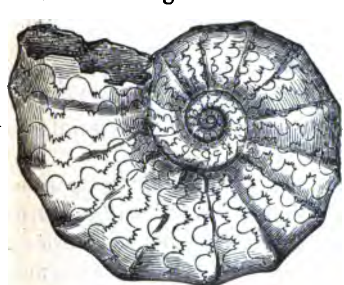
1. Conformément à l'une des recommandations des Congrès géologiques, nous substituons les trois préfixes *éo*, *méso*, et *néo*, aux préfixes *intra*, *médio* et *supra* que nous avions jusqu'alors employés.
2. Anciens *infracrétacé* et *supracrétacé*.

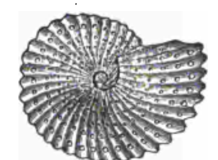
de calcaires avec organismes pélagiques, tandis que, à l'ouest aussi bien que dans l'Amérique du Nord, on voit prédominer les lacs salés et les lagunes, dont le fond se comble avec des argiles et des grès aux couleurs vives et bariolées.


Fig. 69. — Traces de *Chirotherium*.

Les plages incertaines de ces lagunes sont fréquentées par de nombreux *reptiles labyrinthodontes*, tels que *Chirotherium*, dont les traces de pas (fig. 69) abondent en Saxe comme au Connecticut, et par d'autres reptiles, ceux-là bipèdes, les *dinosauriens*, souvent signalés par des traces à trois doigts, qui offrent une grande analogie avec celles des oiseaux.

Les mers largement ouvertes voient s'épanouir, parmi les céphalopodes, la grande famille des *ammonites*, représentée par *Ceratites* (fig. 70), *Trachyceras* (fig. 71), etc.


Fig. 70. — *Ceratites nodosus*.


Fig. 71. — *Trachyceras Aon*.

Dans les cératites, les lignes de suture se compliquent de dentelures localisées sur les lobes, tandis que les selles en sont exemptes. Les autres ammonoïdés du système offrent à

cet égard une grande diversité, et il en est, comme *Pinacoceras*, qui montrent la différenciation la plus avancée que la ligne de suture ait jamais subie chez les ammonites.

La famille des ostracées, à peine représentée dans le permien, se développe dans le trias, en compagnie de pélécypodes des genres *Halobia* (*Daonella*) (fig. 72), *Pseudomonotis*, etc. D'innombrables échinodermes de la famille des encrines (fig. 73) laissent leurs dépouilles dans les calcaires de l'époque, en compagnie de petites algues calcarifères, *Diplopora*, *Gyroporella*, capables de constituer des bancs entiers.

A côté des genres nouveaux de mollusques qui apparaissent avec le trias, on voit persister un certain nombre de types anciens de brachiopodes et de céphalopodes (en particulier des orthocères), grâce auxquels la faune marine triasique offre en quelques points un caractère de transition.



Fig. 72. — *Halobia* (*Daonella*) *Lommeli*.

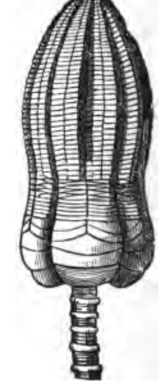


Fig. 73. — *Encrinus liliiformis*.

La flore triasique appartient déjà à l'ère des gymnospermes par la prédominance des cycadées (*Zamites*, *Otozamites*, *Pterophyllum*), des conifères telles que *Voltzia*, et des salisburiées. Les prêles (*Equisetum*) y sont représentés par des formes géantes; et la plupart des cryptogames vasculaires de l'ère paléozoïque ont disparu.

Types et divisions du système. — Le système triasique se présente en Europe sous trois facies distincts : 1° un facies *pélagique* ou de haute mer, reconnu d'abord au Tyrol et dans les Alpes autrichiennes, mais encore mieux carac-

térisé dans la région asiatique; 2° un facies *mixte*, celui de la Franconie, de la Souabe et des Vosges, offrant la triple division d'où est venu le nom de *trias*, division fondée sur l'intercalation d'une assise calcaire coquillière et marine (*muschelkalk*, *conchylien* de d'Orbigny), entre deux étages, celui du bas, arénacé et d'origine plutôt continentale, celui du haut, argileux, lagunaire et saumâtre; 3° un facies *lagunaire* et continental, développé surtout dans l'ouest de l'Europe, et auquel appartient en majorité le *nouveau grès rouge* d'Angleterre. Du reste, les nuances vives et bariolées sont caractéristiques des sédiments du trias. Elles se retrouvent jusque dans le type pélagique du système, où les calcaires marmoréens sont souvent tachés de rouge.

Le trias inférieur ou série *éotriasique* forme l'étage *werfénien* (de Werfen dans les Alpes orientales). C'est aussi ce qu'on a appelé l'étage *scythien*. Dans la série *mésotriasique* ou *virglorien* (du col de Virgloria) se rangent, d'abord le *dinarien*, puis le *ladinien*. Enfin la série *néotriasique* ou étage du *Keuper* comprend le *tyrolien*, surmonté du *juvavien*. Encore faut-il ajouter que les Allemands ont l'habitude de placer au sommet du trias l'étage *rhétien*, que nous décrirons avec le système jurassique.

Chacun de ces étages ou sous-étages se subdivise lui-même en zones, d'après les ammonoïdés dominants. On en a distingué plus de 20.

Données générales sur le werfénien. — Longtemps le trias inférieur n'a été connu que sous la forme qu'il affecte dans l'Europe septentrionale et la région méditerranéenne occidentale, c'est-à-dire une suite d'assises gréseuses, de couleur rouge ou bariolées de rouge, qui lui ont valu le nom de *grès bigarré* (*bunter Sandstein* des Allemands). Cette formation, continentale ou lagunaire, n'offrait guère en fait de fossiles que des végétaux terrestres et des traces de pas de reptiles, avec quelques mollusques ou entomostracés d'eau douce ou saumâtre.

Les progrès de la géologie dans les Alpes orientales ont fait reconnaître, au même niveau, l'existence d'assises marines, développées à Werfen près de Salzbourg, et dont on

a fait l'étage *werfénien*. Le genre d'ammonoïdés *Tirolites* en était caractéristique. Depuis lors on a reconnu que le werfénien d'Europe ne pouvait donner qu'une idée très incomplète de la série marine du trias inférieur. C'est dans l'Inde, la Sibérie et l'Asie orientale que l'étage se présente avec tout son développement. On y a distingué sept zones d'ammonoïdés, débutant par *Otoceras* pour continuer par *Proptychites* et finir avec *Flemingites*, le tout embrassé sous la dénomination d'étage *scythien*, et divisible en trois sous-étages.

Province germanique. — On donne le nom de province germanique à la partie de l'Europe qui, s'étendant, de la Silésie à l'Angleterre et comprenant la région vosgienne, a vu se développer partout le facies du *grès bigarré*.

Quand la formation est complète, comme c'est le cas en Souabe, on distingue une assise inférieure, avec grès souvent *tigrés* : une assise moyenne ou *grès bigarré principal*, généralement riche en conglomérats; enfin une assise supérieure, assez mélangée d'argile, avec gypse, sel gemme et dolomie. C'est le *röth*, où se font sentir les préliminaires de l'invasion marine qui marquera la période suivante.

Les fossiles du grès bigarré sont des prêles, *Equisetum arenaceum*, et des conifères, *Voltzia heterophylla*, avec des traces de pas de reptiles. Le Röth contient, jusqu'aux environs de Bade, des mollusques marins du genre *Myophoria*. Plus on va vers l'est et plus le caractère marin s'y prononce, s'affirmant en Thuringe orientale et en Silésie par des ammonoïdés du genre *Beneckeia*.

La base de l'étage manque dans les Vosges, où les énormes poudingues du *grès vosgien* appartiennent à l'assise moyenne. Ces conglomérats attestent la destruction, presque sur place, d'un ancien massif qui, à en juger par la distribution des éléments, devait être un peu au sud des Vosges actuelles. L'assise supérieure ou *grès à Voltzia* est celle qui fournit les pierres rouges de construction si usitées dans tout le pays. Tout le grès bigarré a dû se déposer contre une terre pourvue d'un relief inégal et soumise à un affaissement progressif; car il est des points des Vosges où le grès à Voltzia repose

directement sur les terrains antérieurs au trias. La même chose a lieu près de Sierck, où le grès bigarré supérieur, comblant les inégalités du substratum dévonien, déborde les assises antérieures.

Plus à l'ouest, l'Ardenne était émergée. On n'y trouve que quelques lambeaux de poudingues, comme celui de Malmédy, qui semblent représenter d'anciens deltas lacustres, et pourraient d'ailleurs appartenir au permien aussi bien qu'au trias.

Les roches rouges se poursuivent en profondeur sous la Westphalie, et reparaissent aussi à Helgoland, établissant la jonction du bassin germanique avec les lagunes où s'est déposé le *grès tacheté* qui forme en Angleterre la base du *nouveau grès rouge* (*new red sandstone*), assise assez puissante de grès et de conglomérats, répondant aux mêmes conditions de dépôt qu'en Souabe.

Province méditerranéenne occidentale. — C'est aussi sous la forme de grès rouges que le trias inférieur apparaît dans les Pyrénées et en divers points de l'Espagne orientale, alors occupée par des lagunes qui, appuyées à l'ouest contre le massif ancien, devaient être en communication lointaine et difficile avec la mer werfénienne de l'orient, dont il semble qu'on trouve une trace en Sardaigne.

L'Afrique du Nord devait être moins éloignée du régime marin, à en juger par les calcaires à myophories signalés en quelques points des provinces d'Oran et de Constantine, et se reliant sans doute aux formations analogues de la mer de Marmara.

Province alpine. — C'est auprès de Salzbourg que se montrent les schistes werféniens à *Tirolites*, associés à des argiles avec gypse et sel gemme, qui montrent qu'on était encore loin du régime marin franc. Ce régime est mieux accusé dans le Tyrol méridional, où les calcaires apparaissent, et dans les Alpes Carniques, où il y a passage du calcaire werfénien au calcaire à bellérophons. La mer a aussi laissé des traces en Dalmatie, en Bosnie et en Bucovine, ce qui invite à chercher vers l'est sa jonction probable avec la mer asiatique. Mais la communication devait être peu facile, car sur 212 espèces de

céphalopodes reconnues dans le scythien d'Asie, 25 seulement ont été retrouvées dans la province alpine.

D'ailleurs, dans l'ouest de la région alpine, les conditions redevenaient littorales, comme l'indiquent les puissantes masses de grès dits quartzites de Modane.

Russie, Asie, Amérique. — La Russie orientale devait former alors une grande lagune, sans communication directe avec la mer alpine. Des grès rouges et des marnes bariolées s'y étendent de la mer Glaciale à la Caspienne, sans autres fossiles que des végétaux terrestres. Mais ce golfe débouchait au sud-est dans la mer asiatique, car un calcaire à *Tirolites* apparaît dans la steppe Kirghiz, tout à côté de marnes à fossiles d'eau douce, tandis que d'autres marnes contiennent du sel et du gypse.

Par l'Arménie et le Darvaz, la mer werfénienne se poursuivait sur le Salt Range et l'Himalaya. Le *scythien* y débute par une assise à *Otoceras* et à *Bellerophon*, qui fait le passage au permien, et continue par les calcaires et grès à *Ceratites*.

La même mer atteignait le Pacifique par le Tonkin; mais elle continuait à respecter au sud la terre de Gondwana, où se formaient les *grès de Panchet*, à *Glossopteris* et reptiles, ayant leurs équivalents en Australie en Nouvelle-Zélande.

La mer werfénienne du Pacifique, faisant à l'est le tour du continent de l'Angara, venait en baigner le bord septentrional et oriental, déposant, près de l'embouchure de l'Amour comme à celle de l'Olenek, des grès et schistes avec céphalopodes du trias inférieur, notamment des *Meekoceras*. Les mêmes céphalopodes se retrouvent dans l'Idaho et la Californie, montrant que la mer empiétait un peu sur l'ouest de l'Amérique du Nord, mais avec des contours peu différents de ceux du Pacifique actuel.

Quant à la région atlantique des États-Unis, il s'y est déposé un puissant système de grès rouges, où il est possible que le trias inférieur soit représenté; mais on n'en a pas de preuves paléontologiques.

§ 3

SYSTÈME TRIASIQUE
2° SÉRIE MÉSOTRIASIQUE

Données générales sur le trias moyen. — L'apparition des fossiles marins au sommet du grès bigarré, dans le *röth*, laissait prévoir l'invasion marine qui allait se produire dans l'ouest de l'Europe. Dès le début du trias moyen, les lagunes sont rejetées sur l'emplacement de la mer du Nord et de l'Angleterre. La mer s'avance dans l'ouest jusqu'au méridien de Nevers, et submerge largement les régions méditerranéennes. Cependant une grande île ou ligne d'îles subsiste, reliant la Bohême par la Suisse et le Piémont à la Corse, de manière à rendre difficile la communication entre la mer, toujours peu profonde et assez enfermée, de l'ancienne province germanique, et celle qui couvre le sud-est de l'Europe, où le régime sera bien plus pélagique.

Le trias moyen correspond, dans l'ensemble, à l'épisode marin qui, dans la province germanique, a donné lieu à la formation d'un calcaire grisâtre, nommé *muschelkalk* à cause de l'abondance des coquilles dans quelques-uns de ses bancs. Lorsqu'on a commencé à connaître la série triasique du Tyrol et des Alpes orientales, on a considéré comme *muschelkalk alpin* le *calcaire de Virgloria* ou virglorien. Mais une étude plus approfondie a montré que le muschelkalk germanique montait plus haut que le virglorien, qui représentait seulement les zones à *Ceratites binodosus* et à *Cer. trinodosus*. Non seulement il a fallu y adjoindre, dans la province alpine, les zones à *Protrachyceras*, formant le sous-étage *ladinien*; mais on s'accorde généralement à comprendre dans le trias moyen la zone à *Trachyceras Aon*, équivalent pélagique d'une assise germanique que son caractère pétrographique avait fait rattacher au keuper ou trias supérieur.

Le début du virglorien coïncide avec l'arrivée, dans les eaux alpines, de plusieurs genres d'ammonoïdés qui n'y avaient pas eu de précurseurs. *Pinacoceras*, avec ses cloisons extraordinairement persiliées, est de ce nombre.

Province germanique. — Le muschelkalk de la Souabe et de la Franconie comporte trois divisions : l'assise inférieure, appelée *Wellenkalk* à cause de la surface ondulée de ses lits, est le gisement des ammonoïdés *Beneckeia*, *Hungarites*, etc. On y trouve une espèce alpine, *Ceratites trinodosus*. L'assise moyenne, dite *groupe de l'Anhydrite*, se compose de dolomies avec anhydrite, gypse et sel; elle témoigne d'une tendance momentanée au retour des conditions lagunaires. Mais le régime marin se rétablit avec l'assise supérieure, celle du *muschelkalk principal*, gisement des *Ceratites nodosus* et *Cer. semipartitus*, avec un lit pétri d'*entroques* ou fragments d'encrines (*Encrinus liliiformis*) à la base, tandis qu'au sommet se montrent, dans une dolomie, les plus anciens restes de dinosauriens connus en Europe.

La considération des ammonoïdés plaide pour l'attribution au trias moyen de l'assise du *keuper charbonneux* (*Kohlenkeuper* ou *Lettenkohle*), ainsi nommée de la présence d'un charbon de médiocre qualité. Des bancs marins à *Ceratites Schmidi* y sont associés à des couches avec végétaux terrestres, où l'on retrouve quelques espèces du grès bigarré. C'est une formation d'estuaires, annonçant la fin du régime marin dans l'ouest de l'Europe. Les dents de *Ceratodus* abondent à ce niveau.

Dans la région vosgienne, à proximité d'anciens massifs émergés, le wellenkalk est remplacé par une assise arénacée, le *grès coquillier* (*muschelsandstein*) de Soultz, de Luxeuil et de Domptail. Mais le muschelkalk supérieur, gris de fumée, à cassure homogène, dénotant le produit de la consolidation d'une vase calcaire, reproduit le facies et la faune de la Souabe, avec ses encrines, ses *Terebratula vulgaris*, *Gervillia* (*Hörnesia*) *socialis*, etc. Cependant une grande différence subsiste, résultant de l'absence du gypse et du sel dans le muschelkalk vosgien.

Vers l'ouest, du côté du Luxembourg, l'étage subit une transformation marquée. Il devient marneux et salifère, en même temps qu'il déborde les assises inférieures. Puis les conglomérats apparaissent dans ses bancs les plus élevés, les rendant très difficiles à distinguer des poudingues du

grès bigarré. C'est le facies littoral, causé par le voisinage de l'Ardenne, toujours émergée.

Angleterre. France orientale. — La mer du muschelkalk n'a pu communiquer avec l'Angleterre qu'en faisant le tour par la Hollande. Encore n'a-t-elle laissé aucune trace bien nette dans ces régions septentrionales. On a coutume d'attribuer au trias moyen le conglomérat calcaire, à ossements de dinosauriens et dents de *Ceratodus* qui, dans le centre de l'Angleterre, s'intercale au milieu des grès rouges et des marnes du *new red.*

Du reste, le facies calcaire du muschelkalk s'atrophie aussi, en partant des Vosges, dans la direction du sud-ouest. Contre le bord oriental du Plateau Central, on voit surtout des grès et des arkoses, que leur nature arénacée avait autrefois fait attribuer au grès bigarré, mais que certaines trouvailles de fossiles conduisent à rattacher au trias moyen, devenu gréseux à cause du voisinage du massif archéen.

En revanche, près des Alpes et du Jura, le caractère marin est plus franc; même, dans les Préalpes, on voit apparaître des calcaires à *Diplopora*, forme alpine d'algue calcarifère, qui jouera un grand rôle dans la province méditerranéenne. Mais en Provence, non loin de l'îlot archéen des Maures, le muschelkalk à encrines redevient normal, si ce n'est que sa base est gréseuse, tout en contenant des cératites.

Province méditerranéenne. — Si maintenant nous passons dans la province méditerranéenne du trias, qui va des Alpes bavaroises aux Alpes lombardes par le Tyrol, nous y trouverons à la fois une plus grande richesse en ammonoïdés et une plus grande variété de sédiments. Tandis que le *calcaire de Virgloria*, équivalent latéral de la dolomie de Mendola, représente le wellenkalk, aux assises supérieures du muschelkalk allemand correspondent en Lombardie les calcaires de Recoaro et d'Esino, dont la célèbre dolomie du Schlern n'est qu'un facies local propre au Tyrol méridional. Cette dolomie, puissante de 1 000 mètres et massive, offre des restes de polypiers et de diplopores. Elle résulte vraisemblablement de l'enrichissement en magnésie d'un calcaire à la construction duquel les prairies sous-marines d'algues calcarifères

avaient puissamment concouru. Ailleurs, ce sont des schistes qu'on observe à ce niveau.

La série se termine par les *couches de Saint-Cassian*, à *Trachyceras Aon*, véritables tufs de porphyre basique, avec nombreux fossiles offrant une association curieuse de formes à facies primaire avec des céphalopodes franchement secondaires. C'est l'horizon de la Lettenkohle germanique.

L'influence de la province alpine et méditerranéenne se faisait sentir à l'occident jusqu'aux Baléares et à l'embouchure de l'Ebre, tandis qu'à l'ouest de ces points le muschelkalk gardait le facies germanique. C'est aussi l'influence alpine qui régnait en Piémont et dans les Apennins de la Ligurie, comme en témoignent plusieurs apparitions de couches à encrines et à diplopores, devenues plus ou moins métamorphiques. La Basilicate, la Calabre, la Sicile, étaient dans les mêmes conditions.

Par le Semmering et le Bakony-Wald, on suit le rattachement du trias alpin à celui de la Silésie, où ses formes se mélangent à celles de la province germanique. A partir de là, on retrouve des traces de la même mer en Bucovine, sur les Balkans, la Bosnie, la Dalmatie, et on est ainsi conduit, de proche en proche, jusqu'aux rivages de l'Asie Mineure, où le golfe d'Ismid, sur la mer de Marmara, laisse affleurer un calcaire à *Protrachyceras*.

Asie, Afrique, Amérique. Régions arctiques. — A partir de ce point, on perd, faute de connaissances précises de la région, les traces de la jonction qui a certainement existé entre la mer triasique de l'Europe et celle de l'Inde, où, dans le Salt Range, le *calcaire à cératites* supérieur offre une riche faune d'ammonoïdés, bien développée aussi dans l'Himalaya, avec les couches à *Daonella*.

Bien entendu, au sud de ce bras de mer indien, la terre de Gondwana persiste, et avec elle la terre africaine du Karroo, où la représentation du trias moyen doit être cherchée entre le milieu de l'étage de *Beaufort*, riche en *Glossopteris*, et la base de l'assise de *Stormberg*, dans laquelle ce genre si caractéristique cesse d'être représenté.

Par la Birmanie, la mer indienne arrivait au Pacifique,

laissant, comme celle de l'étage précédent, des traces sur les rivages de la Mandchourie, du Japon et de la Sibérie, et pénétrant même jusqu'au Spitzberg, où les *Ptychites*, *Ceratites* et *Daonella* prospéraient tout comme dans l'Inde.

De l'autre côté, la mer du trias moyen baignait l'Alaska, les monts Cascades et la Californie, atteignant même le Nevada. Mais, plus à l'est, dans les Montagnes Rocheuses, l'étage reprend la forme de grès rouges et de marnes bariolées gypsifères.

Les Américains ont désigné sous le nom de *série de Newark* une bande de grès rouges, avec schistes noirs et conglomérats, qui s'étend tout le long du bord atlantique des États-Unis. En quelques points, une flore semblable à celle de la *Lettenkohle* y a été recueillie. Il y a donc lieu de faire dans cette série une part au trias moyen. Mais ici c'est le facies continental qui prédomine, et il est probable qu'à cette époque encore, une grande terre, ou un groupe de terres, occupait la place de l'Atlantique septentrional, sur les côtes duquel aucun fossile marin du trias moyen n'a jamais été rencontré.

En revanche, la mer arctique de l'époque s'avançait au sud jusqu'à l'île des Ours.

§ 4

SYSTÈME TRIASIQUE
3° SÉRIE NÉOTRIASIQUE

Données générales sur le trias supérieur. — L'apparition des couches de charbon, dans la *Lettenkohle*, présageait, à la fin du trias moyen, une prochaine retraite du régime marin hors de la province germanique. Cette retraite s'effectue dès le trias supérieur ou *keuper*, non que l'eau salée renonce à visiter la province, mais parce qu'elle n'y apparaîtra plus désormais que sous forme de lagunes, où l'évaporation fera naître des gîtes de sel et de gypse, au milieu de sédiments argileux et bariolés.

Il n'en est pas ainsi au delà de la barrière alpine, où le

régime marin persiste, engendrant d'importantes assises de calcaires et surtout de dolomies. Les algues calcarifères jouent encore un grand rôle dans l'édification de ces massifs ; mais, en général, le genre *Gyroporella* y remplace *Diplopora*.

Quant aux ammonoïdés, on assiste au déclin de *Trachyceras*, à l'épanouissement des *Pinacoceras* et *Tropites*, enfin à

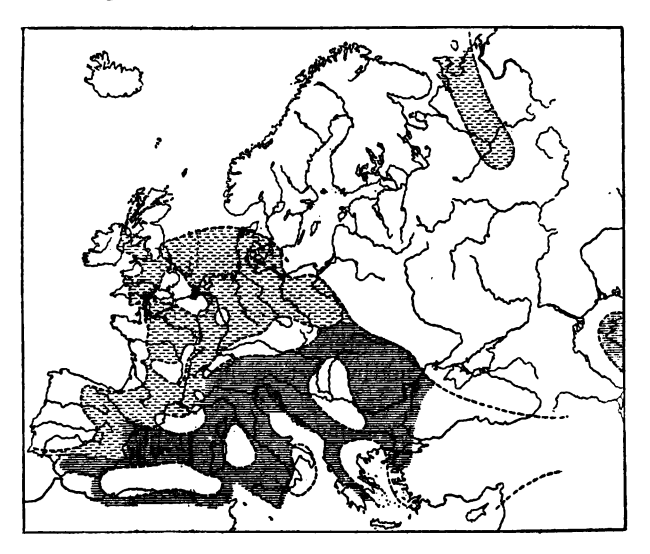


Fig. 74. — L'Europe à la fin du trias.
(Les hachures interrompues marquent le régime lagunaire.)

l'apparition du genre *Phylloceras*, destiné à demeurer essentiellement méditerranéen.

Le trias supérieur a été souvent divisé en étage *carnien* à la base, et étage *norien* au sommet, ce dernier ayant pour synonyme *juvavien* (de Juvavo, nom latin de Salzbourg).

Province germanique. — Dans toute la partie de l'Europe située à l'ouest d'une ligne reliant les sources de la Vistule au détroit de Gibraltar (fig. 74), la forme normale du *keuper* est celle des argiles, bariolées de rouge, qu'en France on a improprement nommées *marnes irisées*.

En Franconie, des argiles bariolées gypsifères (*Gypskeuper*) sont surmontées par des grès, que l'abondance des restes végétaux du genre *Equisetum* a fait nommer *grès à roseaux*, et qu'encadrent des marnes avec dolomies à fossiles marins, couronnées par une marne à concrétions calcaires (*Steinmergelkeuper*). Cette dernière assise contient les restes de grands dinosauriens. Ainsi constamment la terre ferme et les lagunes se sont disputé le terrain.

En Lorraine, la partie inférieure des marnes bariolées contient d'importants gisements de sel gemme et de gypse [1], et le *grès keupérien* qui les surmonte renferme par endroits des veines d'une houille impure, qu'il ne faut pas confondre avec la *Lettenkohle* du trias moyen. C'est encore par des dolomies que se termine le trias supérieur lorrain, où apparaissent sporadiquement quelques espèces marines, notamment le mollusque *Myophoria Goldfussi.*

Angleterre, France occidentale et méridionale. Espagne. Alpes occidentales. — Les marnes bariolées (*variegated marls*) se retrouvent en Angleterre, avec veines de gypse et de sel, et grès subordonnés. Les fossiles sont des reptiles et des crustacés du genre *Estheria.* Les espèces marines se montrent encore plus rarement qu'en France. Cependant elles ont réussi à pénétrer au moins jusque dans le comté de Warwick. L'Irlande orientale, la Cornouailles et le Cotentin paraissent marquer la limite occidentale des lagunes du trias supérieur, qui aurait déposé contre ces anciens massifs des conglomérats avec argiles rouges.

A partir des Vosges, les argiles bariolées se poursuivent, avec leur composition normale, sur la Haute-Saône et atteignent le bord du Morvan, où le voisinage du littoral granitique se traduit par des couches d'*arkose.* Les argiles rouges avec gypse continuent sur l'Auxois, le Bourbonnais et le Berry, comme dans le Jura et le mont d'Or lyonnais. Les indices de sel n'y font pas défaut.

1. D'où le nom de *salifėrien*, que d'Orbigny avait donné au trias supérieur, mais qui s'applique mal à l'Allemagne, où le sel existe surtout dans le trias moyen.

Contournant le Plateau Central, les lagunes se sont étendues sur l'Aquitaine et ont engendré, dans les Pyrénées, des gîtes salifères comme ceux de la Chalosse et de Salies, ainsi que les marnes gypsifères qu'on suit de la Haute-Garonne aux Corbières. Le même facies s'étend sur l'Espagne orientale, à l'exception toutefois des provinces méditerranéennes. On le retrouve aussi en Provence, mais avec un développement tout particulier des *cargneules* (*carnioles*, *cornieules*) où dolomies cloisonnées.

Ces cargneules, accompagnées de gypse, deviennent le facies dominant du trias supérieur dans les Alpes occidentales, c'est-à-dire dans la Maurienne et le Briançonnais, où des schistes lilas et verts les accompagnent. On les retrouve à Bex, en Suisse, associées à un important dépôt salifère. Mais plus loin se prononce un facies schisteux, celui des *schistes lustrés*, qui vont de la Tarantaise aux Grisons, où ils ont subi un métamorphisme accentué.

A partir de la vallée du Rhône, le trias supérieur revêt un facies mixte, et l'apparition de bancs à gyroporelles indique que la barrière alpine n'était pas assez continue pour ne pas permettre de temps en temps le mélange du type septentrional avec celui de la région méditerranéenne, dont nous allons maintenant parler.

Province méditerranéenne. — Au sud-est de la barrière alpine, le régime marin continuait à prévaloir dans les couches de Raibl et les oolithes à *Cardita crenata* qui, vers l'est seulement, s'entremêlent de grès à végétaux terrestres (Lunz). Au-dessus se développe, dans les Alpes bavaroises et le Tyrol comme en Lombardie, la *Dolomie principale* ou *Grande Dolomie*, à *Turbo solitarius* et *Avicula exilis*, remplacée aux environs de Salzbourg par la série importante et disloquée des *calcaires de Hallstatt*, bariolés, souvent marmoréens, avec nombreux ammonoïdés. Mais ces roches elles-mêmes ne forment que des îlots se fondant latéralement dans un grand massif calcaire, le *calcaire du Dachstein*, où les gyroporelles sont associées à de grosses coquilles bivalves du genre *Megalodon*.

Du reste, ce massif a dû se former à peu de distance d'un

rivage; car, du Vorarlberg aux approches de Vienne, il laisse voir des intercalations de schistes bitumineux fétides et de lignites.

En voyant les dolomies si fréquentes dans le trias, et en se souvenant qu'un calcaire parcouru par des eaux magnésiennes doit tendre à s'enrichir en carbonate de magnésie, tandis qu'il perd du carbonate de chaux, plus soluble, on échappe difficilement à l'idée que la formation des dolomies a dû être l'un des phénomènes accessoires de l'asséchement de lagunes maritimes; car l'eau de mer renferme toujours du chlorure de magnésium.

Le régime méditerranéen s'étendait sur la Dalmatie, où des tufs porphyriques supportent des calcaires avec ammonites de Hallstadt. Il régnait aussi en Serbie, et si quelques parties de la Hongrie étaient alors émergées, du moins la mer, contournant ces îlots, atteignait le Tatra (où il se fait une juxtaposition du facies calcaire avec celui des marnes rouges), puis la Bucovine et la Dobrogea. Les calcaires à gyroporelles du Balkan central montrent l'un des chemins que suivait la mer pour passer d'Europe en Asie; mais un autre, plus méridional, paraît indiqué par certains calcaires du Péloponèse et de la Crète.

Italie, Sardaigne, Espagne méridionale, Algérie. — La série à facies archéen des Alpes Cottiennes contient des intercalations de calcaires et de dolomies à *Turbo solitarius*. En tout cas, la présence du trias supérieur de type méditerranéen n'est pas douteuse dans les Alpes maritimes italiennes, ainsi que dans les Alpes Apuanes, où la dolomie contient des gyroporelles. Une grande partie de la masse des marbres de Carrare appartiendrait à cet horizon. La même chose a lieu dans la Basilicate, et, en Calabre, l'ensemble des calcaires à *Megalodon* et à gyroporelles, avec schistes subordonnés, atteint 2 000 mètres. Le type méditerranéen n'est pas moins net en Sicile, sous forme de dolomies et de calcaires à silex, avec les céphalopodes caractéristiques de l'étage et les mollusques (*Halobia*, *Daonella*) d'Hallstatt.

Des calcaires semblables existent en Sardaigne, et c'est encore le type alpin qui prévaut aux Baléares ainsi que dans

la chaîne bétique, au sud de la Sierra Nevada. Ainsi, au rebours de ce qui se passait dans le nord de l'Europe, la région méditerranéenne a vu la mer du trias supérieur s'étendre vers l'ouest plus loin que lors du trias moyen, accumulant d'épais revêtements calcaires autour des îlots émergés sur l'emplacement de l'Italie et de la mer Égée.

Mais ce régime n'atteignait pas l'Algérie, où régnait le facies lagunaire, avec dépôts de gypse et de sel.

Le trias supérieur hors de l'Europe. — La mer du trias supérieur a dû se resserrer pour passer en Asie; ses traces s'observent en un point de l'Asie Mineure (Mysie), puis dans l'Afghanistan et le Pamir. C'est elle sans doute qui a déposé les calcaires à *Megalodon* du Salt Range. Mais le principal développement de ce calcaire a lieu dans l'Himalaya, où sa masse puissante couronne un ensemble de calcaires et de schistes à céphalopodes tyroliens.

Tandis qu'au sud le continent de Gondwana continuait à voir se déposer sur son bord la série de *Panchet*, à fougères du genre *Tæniopteris*, la mer himalayenne passait en Birmanie, au Tonkin, à Sumatra et à Timor, où se trouve un calcaire à *Halobia Lommeli*. D'autre part, des schistes calcaires à *Pseudomonotis salinaria*, mollusque de Hallstatt ou forme très voisine, existent en Nouvelle-Calédonie, et des couches semblables se retrouvent en Nouvelle-Zélande, définissant ainsi le pourtour oriental d'un continent australien, lié sans doute à la terre de Gondwana et à l'Afrique australe (couches à reptiles dicynodontes du sommet de l'assise de *Beaufort*).

En même temps, la mer, contournant la Chine, léchait le Japon, empiétait en Sibérie jusqu'à Verkhoiansk et, par le Spitzberg, rejoignait l'île des Ours, où elle a laissé un grès à myophories. Du côté opposé, elle passait sur l'Alaska, comme l'attestent les schistes à *Daonella* du mont Wrangell, arrosait la Colombie anglaise et atteignait la Californie, où les genres de céphalopodes de Hallstatt sont bien représentés. Même cette faune se retrouve dans des calcaires jusque sur les côtes du Pérou.

En revanche, la région atlantique restait soumise au régime continental, et il s'y déposait des grès rouges; sans doute, on

doit y ranger ceux qui, au Connecticut, contiennent de si nombreuses empreintes de pas de dinosauriens et d'amphibies.

CHAPITRE V

SYSTÈME JURASSIQUE

---

§ 1

GÉNÉRALITÉS SUR LE SYSTÈME JURASSIQUE

Traits généraux de la période jurassique. — Les invasions successives de la mer, qui s'étaient produites en Europe lors de la période triasique, présageaient la fin prochaine du régime continental, dont le stéphanien avait vu l'avènement dans les latitudes moyennes de l'hémisphère boréal. Tandis que, dans la partie orientale de l'Amérique du Nord, le sol va demeurer émergé pendant presque toute la durée des temps secondaires, le nouveau régime marin s'installe en Europe avec l'ouverture de la période *liasique*, inaugurant la série des dépôts dits *jurassiques*, à cause de leur développement dans les monts Jura.

Ce n'est pas que la mer jurassique doive occuper en Europe des espaces sensiblement différents de ceux qu'avaient couverts les lagunes triasiques; mais du moins, cette fois, le régime marin va devenir franc; il n'y aura plus d'incertitude sur les rivages, plus de phénomènes d'évaporation, et tous les pays situés à l'ouest du massif scandinave et russe vont former un archipel aux contours variables, mais bien définis pour chaque période. Par les îles de cet archipel, la mer européenne, de la latitude du Danemark à celle des Pyrénées, sera partagée en bras nombreux, ou pour mieux dire en bassins. Ces bassins recevront des sédiments variés et seront fréquentés par des céphalopodes assez nettement différenciés,

tandis que, sur les régions méditerranéennes, où la mer est plus largement ouverte, un type de sédimentation très uniforme coïncidera avec le développement d'une population d'ammonites (*Phylloceras* et *Lytoceras*) beaucoup plus constante dans ses caractères.

Un signe bien caractéristique des temps jurassiques est le recul progressif vers le sud des constructions coralliennes qui, après s'être édifiées sans difficultés jusqu'à la latitude du nord de l'Angleterre, seront, à la fin de la période, reléguées au sud du parallèle de Lyon.

Un autre événement de grande importance, bien que ses conséquences doivent être longues à se faire sentir, est l'apparition de petits marsupiaux, premiers représentants de la classe des *mammifères*. Cette apparition se manifeste dès l'étage *rhétien*, le premier de la série jurassique, et c'est une des raisons qui nous engagent à maintenir dans le système cet étage, que dans d'autres pays on a coutume de placer au sommet du trias.

D'autre part, c'est au sommet du système jurassique que se montrent, pour la première fois, dans les flores continentales, des représentants ou tout au moins des précurseurs des plantes dicotylédones angiospermes, c'est-à-dire de la classe des végétaux qui, par l'ensemble de leur organisation, accusent le jeu des saisons, en même temps que, par leurs fleurs, ils trahissent l'existence d'une brillante lumière solaire. Jusqu'à cette apparition, la flore jurassique se montre assez pauvre et varie peu de la base au sommet du système.

Divisions du système jurassique. — D'une façon générale, dans la partie de l'Europe située au nord et à l'ouest des Alpes, la succession des dépôts jurassiques dénote une évolution progressive de la sédimentation, à laquelle les apports détritiques prennent une part de moins en moins grande à mesure qu'on s'élève. Le fait est surtout frappant en Souabe et dans les régions voisines, où on a depuis longtemps distingué le *jura noir* ou inférieur, surtout argileux; le *jura brun*, formé de calcaires argileux qui brunissent à l'air; enfin, le *jura blanc*, essentiellement calcaire et de couleur claire.

Ces trois divisions sont celles que nous appellerons *éojuras-*

sique, *mésojurassique* et *néojurassique*. Souvent aussi on emploie, surtout en Suisse et en Allemagne, les mots de *dogger* et de *malm* pour les deux dernières séries, la première étant partout connue sous le nom de *lias*.

§ 2

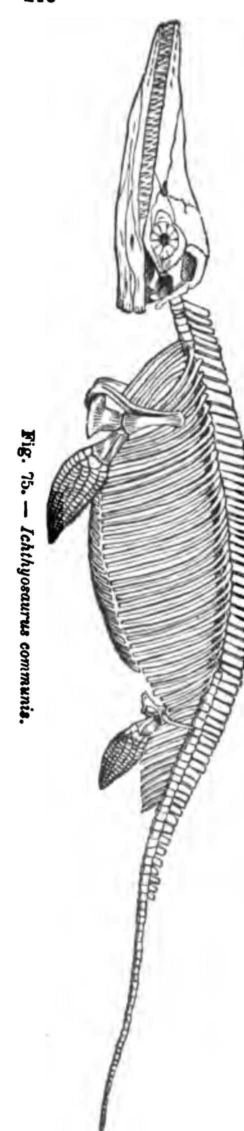
SÉRIE LIASIQUE. DONNÉES GÉNÉRALES

Traits généraux des temps liasiques. — Au début de la série *éojurassique* ou *liasique*, on voit partout, dans le nord de l'Europe, les dépôts de sédiment débuter par des grès, où les grains roulés et grossiers de quartz empâtent de nombreux restes de vertébrés ainsi que des dents de poissons. On dirait d'une sorte de balayage, opéré par la vague qui s'avançait sur les lagunes triasiques, mélangeant les débris des êtres marins et terrestres dans une sorte d'ossuaire, comme l'indique le nom classique de *bone-bed* ou lit à ossements. C'est là que se montrent les premières dents de mammifères (*Microlestes*).

Alors commence, dans l'Europe du Nord, une époque de sédimentation marine, mais littorale, où les restes de végétaux et d'*insectes* terrestres se montrent plus d'une fois associés aux coquilles de mer. Les plages sont fréquentées par de grands reptiles nageurs, les *sauriens*, ichthyosaures (fig. 75), plésiosaures, etc., dont les squelettes entiers abondent dans certains gisements de l'Angleterre et du Wurtemberg. Les poissons ganoïdes de l'époque (*Lepidotus*) ont cessé d'avoir leur nageoire caudale dyssymétrique.

Les vraies *ammonites*, aux cloisons persiliées, sont nombreuses et les principaux genres s'y succèdent dans l'ordre suivant : *Psiloceras*, *Schlotheimia* (fig. 81), *Arietites* (fig. 76), *Ægoceras*, *Amalthæus* (fig. 79), *Harpoceras*. Mais à côté de ces types, qui caractérisent les mers continentales, on continue à trouver, dans les océans plus largement ouverts, les genres *Phylloceras* et *Lytoceras*, déjà annoncés dans le trias.

Une nouvelle famille de céphalopodes apparaît : celle des *bélemnites*, représentées par leurs osselets ou rostres


Fig. 75. — *Ichthyosaurus communis.*

(fig. 77, 78). Les huîtres parviennent enfin à prendre un grand développement, jonchant les dépôts argileux de coquilles de *gryphées* (fig. 80), auxquelles s'adjoignent parfois des *plicatules* (fig. 82). A côté de brachiopodes de type ancien, comme *Spiriferina*, pullulent les *rhynchonelles* et les *térébratules* (fig. 83). Enfin les crinoïdes sont fréquents et souvent très bien conservés.

Quant à la flore, elle se fait remarquer par l'apparition des premiers monocotylédonés et par le grand nombre des cycadées qu'elle contient. De plus, les caractères de la végétation de la période accusent à la fois une grande monotonie et l'absence de zones climatologiques bien définies.

Divisions de la série liasique. — La série liasique peut être divisée en cinq étages. Celui du bas, qui correspond au prélude de l'invasion marine et comprend les gisements de *bone-bed* à dents de poissons et ossements de vertébrés, est l'étage *rhétien*, ainsi nommé des Alpes Rhétiques. Il embrasse une partie de l'*infra-lias* des anciens auteurs. L'autre partie forme l'étage *hettangien*, dont le type a été choisi dans le grès d'Hettange, près de Luxembourg. Ensuite vient le *sinémurien*, bien caractérisé dans l'Auxois et spécialement aux environs de Semur; c'est la partie inférieure du *lias* proprement dit (ainsi nommé d'une désignation usitée en Angleterre parmi les carriers). Le système

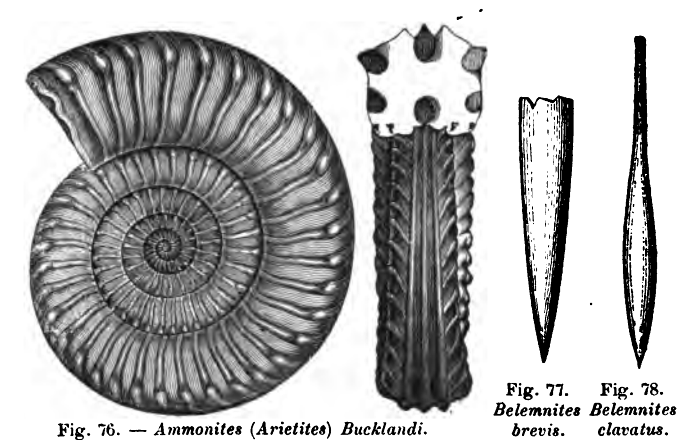


Fig. 76. — *Ammonites* (*Arietites*) *Bucklandi*.

Fig. 77. *Belemnites brevis*.

Fig. 78. *Belemnites clavatus*.



Fig. 79. — *Ammonites* (*Amalthæus*) *margaritatus*.



Fig. 80. — *Gryphæa arcuata*.

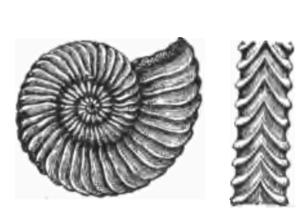


Fig. 81. — *Ammonites* (*Shlotheimia*) *angulatus*.



Fig. 82. — *Plicatula spinosa*.

se termine par les étages *charmouthien* (ancien *liasien*) et *toarcien*, ce dernier tirant son nom de Thouars en Poitou, localité où il est très fossilifère.

§ 3

SÉRIE LIASIQUE

1° ÉTAGE RHÉTIEN

Le rhétien d'Europe en dehors de la barrière alpine. — Si le rhétien tire son nom des Alpes Rhétiques, c'est en Souabe, sur le côté nord de l'ancienne barrière alpine, que l'importance de cette division a été pour la première fois reconnue.





Fig. 83. — *Terebratula Waidheimia numismalis.*

L'étage y débute par une assise de grès qui se délite en sable miroitant (*silbersand*), avec quelques bivalves caractéristiques de cet horizon, notamment *Avicula contorta* (fig. 84) et *Gervillia præcursor*. Au-dessus vient ce qu'en Allemagne on a nommé le *cloaque*, à cause de l'association des coprolithes avec des restes de vertébrés. C'est le *bone-bed*, ou lit à ossements, dans lequel a été trouvé, à la porte de Stuttgart, le premier mammifère, *Microlestes antiquus*.

Dans la région lorraine, le rhétien débute aussi par une assise arénacée, le *grès de Vic* (*grès infraliasique*), que surmonte également un bone-bed. Une couche de marnes rouges, qui se présente habituellement au sommet de l'étage, marque un retour des conditions du trias supérieur et justifie le nom de *couches de jonction*, donné au rhétien de la Lorraine. On suit l'étage par Kedange, le long de l'Ardenne, jusqu'à Florenville, où il est débordé par des assises plus jeunes du lias. D'autre part, il s'étend certainement de la Souabe sur la Westphalie, par où la mer rhétienne, contournant une grande terre qui s'avançait jusqu'à la Hollande, a pu atteindre l'Angleterre et envoyer de là au moins un golfe jusqu'au Cotentin.

Le rhétien anglais ou *série de Penarth* forme parfois, dans le calcaire carbonifère sous-jacent, des poches riches en ossements. L'une d'elles a fourni 29 dents de *Microlestes* et jusqu'à 70 000 dents du squale *Acrodus*. En Écosse, l'étage est représenté par un conglomérat qui, à Raasay, repose directement sur le grès précambrien. Partout donc il y a empiétement de la mer, dépôt d'une assise arénacée et accumulation d'ossements charriés.

Le même empiétement, mais sans transport d'ossements, se manifeste en Scanie, à la pointe méridionale de la Suède. Là, près d'Helsingborg, une couche à fossiles marins s'intercale au milieu d'un ensemble de grès lignitifères, à cycadées et à fougères, accusant un rivage. Les traces de ce rivage se retrouvent à Bornholm, en Pologne et en Silésie.


Fig. 84. — *Avicula contorta.*

C'est aussi par des grès, accompagnés de calcaires à *Avicula contorta*, et par des couches ossifères, que le rhétien est représenté entre les Vosges et le Morvan. Comme dans le Nivernais, le Bourbonnais et le Berry, le voinage du massif ancien émergé s'y trahit par la formation d'une arkose grossière, souvent bariolée, passant par places à un grès dolomitique avec empreintes végétales. C'est dans des conditions semblables que le rhétien frange le bord sud-ouest du Plateau Central, pour devenir plus franchement marin dans le Languedoc. Mais il faut arriver dans le bassin du Rhône, en Provence, pour voir disparaître le facies arénacé, faisant place à des schistes et à des calcaires avec *Avicula contorta*, dont les traces se retrouvent dans les Alpes occidentales et le Chablais. Seulement, dans le Briançonnais, et sans doute jusqu'aux Grisons, c'est à une partie des *schistes lustrés* qu'il faut demander la représentation du rhétien. A partir de la Suisse, l'étage, quand il est fossilifère, manifeste des affinités avec la faune de la province alpine.

Province méditerranéenne. — La province alpine ou méditerranéenne du rhétien est bien caractérisée aux Alpes Rhétiques, dans les *couches de Koessen*, marnes à *Avicula contorta* avec calcaires à brachiopodes (*Rhynchonella fissicostata*

et *Terebratula gregaria*). Mais il est des points où cette assise se fond dans la masse du *calcaire du Dachstein*, importante construction édifiée par les organismes dès le trias supérieur, et pouvant même embrasser des termes supérieurs au rhétien. Au sommet de l'étage se trouve, près de Salzbourg, une assise à ammonoïdés du genre *Choristoceras*.

Les calcaires à brachiopodes, à *Terebratula gregaria*, deviennent la forme normale du rhétien sur le bord septentrional des Alpes, et se suivent jusqu'aux Carpathes (*facies carpathique*). Mais par endroits, un calcaire alpin à *Lithodendron* apparaît jusque dans le Tatra. Alors la mer contournait une grande terre, comprenant la Hongrie et le massif balkanique.

Du côté opposé, elle semait des dolomies et des calcaires sur le Frioul, les Apennins, la Calabre, la Corse et même la Sicile, où se retrouvent les *Terebratula gregaria* et *Rhynchonella fissicostata*. Mais ce régime n'atteignait pas l'Espagne, où le facies du rhétien est plutôt provençal, et encore moins le Portugal, sur lequel se formaient à ce moment des grès à végétaux et des marnes à lignites.

Le rhétien hors de l'Europe. — Les traces d'un rivage rhétien se revoient sur le bord méridional de la Caspienne, au Turkestan et dans l'Afghanistan. Au sud de ce rivage, on suit des calcaires ou des dolomies à *Lithodendron* et à *Megalodon* jusqu'au cœur de l'Himalaya, tandis que, plus au sud encore, sur la terre de Gondwana, les couches à végétaux et à combustibles de *Rajmahal*, avec dents de *Ceratodus* et de reptiles, accusent le maintien des conditions continentales.

Un estuaire existait alors sur le Tonkin, où les houilles de Kebao sont subordonnées à des couches contenant une flore franchement rhétienne et encore pourvue de *Glossopteris* ; et la même chose avait lieu dans le Yunnan, sur le territoire duquel se formaient d'importants dépôts de houille grasse, dont la flore s'étendait aussi sur le *Bassin Rouge* du Sé-tchouen en Chine. La mer passait au sud, et laissait des vestiges sur la presqu'île de Malacca.

Mais elle respectait l'Australie et la Nouvelle-Zélande, de même que l'Afrique australe. Là, le sommet de l'assise de *Beaufort*, dernier terme de la série de Karroo, a livré un

mammifère, *Tritylodon*, associé à des reptiles dicynodontes. La grande terre australe continuait vraisemblablement à être unie au massif brésilien, à l'occident duquel se formaient dans des estuaires les dépôts à plantes rhétiennes de Cacheuta en Argentine et de la Ternera au Chili.

Aux États-Unis, une partie des grès et schistes du Connecticut (série de *Newark*) appartient, par sa flore, au rhétien. Et c'est à cette hauteur qu'a été trouvé, dans la Caroline du Nord, le premier mammifère américain, *Dromatherium sylvestre*. Si l'on ajoute que la flore rhétienne est connue du Mexique, de la Californie, du Groenland oriental, du Spitzberg et de la terre François-Joseph, on se fera aisément une idée de l'extraordinaire diffusion de ce groupe de végétaux, qui n'offre pas de différences sensibles sous quelque latitude qu'on l'observe, et affirme par ses cycadées la douceur du climat, même dans les régions polaires.

C'est aussi un fait très frappant que l'extrême rareté des ammonites dans le rhétien. On n'en trouve nulle part en dehors de quelques points de la province méditerranéenne, où apparaissent de rares représentants de genres aberrants, tels que *Choristoceras*.

§ 4

SÉRIE LIASIQUE
2° ÉTAGE HETTANGIEN

Données générales sur l'hettangien. — Aussi difficile à séparer stratigraphiquement du rhétien, avec lequel il a été longtemps réuni dans l'*infra-lias*, que du sinémurien qui le recouvre, l'hettangien n'en est pas moins bien défini, au point de vue paléontologique, par l'apparition dans les mers européennes des ammonites; apparition ordonnée qui permet de distinguer dans l'étage deux zones : la première à *Psiloceras planorbis*, la seconde à *Schlotheimia angulata*.

La source de cette invasion doit sans doute être cherchée dans quelque région mal connue des pays du sud-est, car on remarque que dans la province alpine, les genres *Phylloceras*,

Lytoceras et *Amalthæus* se montrent dès le début de l'étage, tandis qu'ils n'arriveront dans l'ancienne province germanique qu'avec la zone à *Schlotheimia*. Un autre genre d'ammonites très caractéristique du lias inférieur, *Arietites*, naît aussi dans l'hettangien.

Le genre de bivalves *Cardinia* (*Thalassites*) prospère à cette époque. Une circonstance curieuse est la présence, en des points assez distants, de couches avec débris d'insectes à la base de l'étage. Du reste, l'hettangien correspond à un progrès de l'invasion marine jurassique et plus d'une fois on le voit reposer directement sur le Keuper, de même qu'il arrive à la zone à *Schlotheimia* de déborder la précédente. La barrière alpine de l'Europe était alors sensiblement réduite; mais il subsistait çà et là, par exemple dans le massif des Vosges et de la Forêt-Noire, des îlots que la mer allait peu à peu submerger.

Province européenne extra-alpine. — En Souabe, l'hettangien, ou partie inférieure du *lias* α des auteurs allemands, est un mélange d'argiles schisteuses et de grès, où les *couches à Psilonotus* (c'est-à-dire à *Psiloceras*) occupent la base, contenant de nombreuses cardinies.

Très rudimentaire et même incomplet en Lorraine, il se développe aux approches du golfe du Luxembourg, probablement fermé à cette époque après avoir constitué, lors du rhétien, un détroit entre l'Ardenne et l'Eifel. Sa première zone est bitumineuse; mais la seconde, devenue arénacée et puissante de 60 mètres, forme le *grès d'Hettange* (d'où le nom choisi) avec mélange de mollusques marins et de végétaux terrestres. Le *grès de Luxembourg* en est par sa base une dépendance. L'hettangien se poursuit le long de l'Ardenne jusqu'à Charleville, où son caractère littoral est accusé par un lit de poudingue.

On le retrouve en Angleterre, sous le nom de *lias blanc*, débutant au Gloucestershire par un *calcaire à insectes*. C'est encore avec le facies du lias blanc qu'il apparaît dans le Cotentin, formant le *calcaire de Valognes* ou *calcaire d'Osmanville*, à *Pecten valoniensis*. Ce calcaire, déposé contre un rivage, contient des grains de quartz et passe par le bas à un poudingue.

Absent des bords du massif armoricain, l'étage se retrouve dans le Berry, formant le *calcaire pavé* de Saint-Amand et les dalles de Liénesse, à *Ostrea sublamellosa.* En Bourgogne, sa base est le calcaire à cardinies et à huîtres dit *lumachelle*, devenant à Thostes un minerai de fer. La zone supérieure ou calcaire *foie-de-veau* devient aussi ferrugineuse à Mazenay.

Dans la région des Causses, l'hettangien déborde les étages inférieurs, s'appliquant sur l'archéen, et son sommet, par de belles empreintes de végétaux terrestres, accuse des conditions littorales.

Peu développé en Provence, il reparaît, mais avec rares céphalopodes, dans les Alpes occidentales, et passe à l'état de poudingue dans le massif du Mont-Blanc. Il redevient normal dans le Jura. Très fossilifère à Robiac (Gard), il apparaît au mont d'Or lyonnais comme calcaire cristallin dit *choin-bâtard.* Abondant en fossiles à Chalindrey (Haute-Saône), il présente en Argovie une couche très riche en insectes et en végétaux.

Province méditerranéenne. Europe orientale. — Tout autre est la constitution de l'hettangien de l'autre côté de la barrière alpine. Près de Salzbourg, c'est un calcaire bariolé à ammonites, dit *calcaire d'Adneth.* Mais quelquefois on voit reparaître à ce niveau le type massif du *calcaire du Dachstein*, à *Megalodon* et *Lithodendron*; enfin au bord de la Bohême se montre le facies marneux et charbonneux des *couches de Gresten*, retrouvé en plusieurs points de la Hongrie, ainsi qu'à Steierdorf (Banat), où s'exploite une véritable houille; ces gisements, et beaucoup d'autres semblables, dessinant le tour d'une terre orientale balkanique.

Des circonstances analogues permettent de reconstituer un rivage qui passait par Cracovie et Bornholm pour atteindre la Scanie où, suivant les points, l'étage, à l'état de grès, est tantôt marin et tantôt d'eau douce.

Le régime marin demeurait franc sur la Bosnie, ainsi que sur l'Italie. En Lombardie se retrouvent les calcaires bariolés d'Adneth, et la part de l'étage est certaine dans les masses calcaires de l'Apennin comme dans celles de la Calabre et même de la Sicile. C'est donc toujours la répétition des

circonstances depuis si longtemps propres à la région méditerranéenne, mais qui vont en s'effaçant vers l'ouest; car en Espagne, l'étage est tantôt dolomitique, tantôt gréseux avec flore terrestre.

Pays hors d'Europe. — Le type de Gresten se retrouve au Caucase. Ensuite on soupçonne des traces de l'hettangien dans l'Himalaya ainsi qu'en un point de la Chine, mais toute l'Asie orientale devait être alors émergée, ainsi que l'Australie, la Nouvelle-Zélande, l'Inde méridionale et l'Afrique australe.

Quant à l'Amérique, rien encore n'y indique avec certitude la présence de l'étage.

§ 5

SÉRIE LIASIQUE
3° ÉTAGE SINÉMURIEN

Données générales sur le sinémurien. — Le sinémurien, dans les parties de l'Europe situées en deçà des Alpes, marque une régularisation de la sédimentation marine, qui devient beaucoup moins arénacée, engendrant des alternances d'argiles et de bancs calcaires encore mal réglés, où abonderont les gryphées et les ammonites. C'est la forme classique du *calcaire à gryphées arquées*.

Le genre *Arietites* y domine, remplacé dans le haut par *Oxynoticeras*. Les bélemnites commencent à abonder, représentées surtout par une forme courte et pointue, *Belemnites acutus*. On y voit aussi de nombreux fragments de tiges de *Pentacrinus* et des brachiopodes du genre *Spiriferina*.

Europe extra-alpine. — Argileux et calcaire en Souabe [1], mais réduit en Franconie à un grès grossier, le sinémurien à *Gryphæa arcuata* se montre sensiblement le même en Alsace, en Lorraine, en Franche-Comté, en Bourgogne. Son calcaire, parfois hydraulique (et exploité pour cette qualité en divers points), alterne avec des lits d'argile, d'où résultent des terres fortes et fertiles, dont l'Auxois offre le meilleur

1. Où il comprend la partie supérieure du lias α ainsi que le lias β.

type. Les ammonites, *Arietites Bucklandi*, *A. bisulcatus*, y atteignent de très grandes dimensions.

Dans le golfe du Luxembourg, le sinémurien s'ensable, et la partie supérieure du grès dit de Luxembourg lui appartient, sans que la sédimentation accuse aucune interruption dans la masse sableuse depuis l'hettangien.

En Angleterre, la couleur dominante de l'étage lui a fait donner le nom de *lias bleu*. Les couches hydrauliques y abondent, et on y a recueilli de beaux squelettes d'ichthyosaures, de plésiosaures et de ptérodactyles. Mais en Écosse la proximité du rivage se traduit par des schistes et des grès grossiers.

Comme l'hettangien, le sinémurien accuse partout le progrès de l'invasion marine et, près de Bayeux, où ses bancs sont bien réglés, on le voit reposer sur les terrains primaires. L'étage a dû couvrir tout le Morvan, s'appliquant aussi sans intermédiaire sur le gneiss.

On le revoit, mais sous une forme un peu différente, au sud du Plateau Central. Dans les Alpes occidentales, il est à l'état de calcaires noirs, devenant spathiques dans le Chablais, et mélangés de schistes au mont Joly. Alors, sans doute, commençait à se bien prononcer le *synclinal subalpin*, pli concave entourant le futur massif des Alpes cristallines, et destiné à recevoir de grandes épaisseurs de sédiments à facies uniforme, calcaréo-vaseux et schisteux : car une partie des *schistes lustrés* doit revenir à cet étage.

Province méditerranéenne, Asie, Amérique, Afrique. — Au contraire, dans la province méditerranéenne, reparaissent, soit les *calcaires d'Adneth* à *Arietites*, soit des calcaires blancs massifs, ceux du *Hierlatz*, à brachiopodes. Le facies d'Adneth se reproduit dans les calcaires rouges à ammonites de la Lombardie (*Ammonitico rosso inferiore*), dont la base est sinémurienne. On retrouve ces calcaires dans l'Apennin, la Basilicate, la Calabre et la Sicile.

Ce sont aussi des calcaires rouges noduleux à *Arietites* qui nous renseignent sur le passage de la mer sinémurienne en Bucovine, tandis qu'au nord son rivage différait peu de celui de l'hettangien, le sinémurien gréseux de la Scanie étant

aussi susceptible d'un double facies, l'un marin, l'autre lignitifère.

Quelques trouvailles éparses d'*Arietites* renseignent sur le passage de la mer sinémurienne en Asie Mineure et dans l'Himalaya. On sait de plus que des ammonites du même genre sont rejetées par les volcans de boue de Rotti, dans les îles de la Sonde, enfin qu'il s'en trouve dans le Japon.

D'autre part, on a signalé des *Arietites* en Amérique dans l'État de Nevada, en Californie, au Mexique, au Pérou, en Bolivie. Enfin, par 40° de Lat. Sud, on observe dans la Cordillère argentine et chilienne des tufs, des calcaires et des grès à *Spiriferina rostrata* et *Lithotrochus Humboldti*. Ces couches s'entremêlent de conglomérats à éléments porphyritiques, qui annoncent le commencement des éruptions de la chaîne des Andes. Ici l'entrée en scène de l'activité éruptive coïnciderait avec un progrès notable de la mer, s'avançant vers le sud beaucoup plus loin qu'elle n'avait fait depuis longtemps.

L'Algérie est la seule contrée de l'Afrique où le sinémurien soit connu. Le plus souvent dolomitique et sans fossiles, il contient à In-Salah *Spiriferina Walcotti*.

§ 6

SÉRIE LIASIQUE
4° ÉTAGE CHARMOUTHIEN

Données générales sur le charmouthien. — Le lias moyen ou étage *charmouthien* (de Charmouth en Angleterre) correspond, dans l'Europe occidentale, au maximum de transgression de la mer du lias. Jamais les îlots de l'archipel européen ne s'étaient encore trouvés aussi réduits (fig. 85). Aux Ardennes comme en Normandie, on voit le charmouthien reposer directement sur les terrains anciens, en y formant de petites flaques très fossilifères, dont les plus célèbres sont celles de Maubert-Fontaine (Ardennes) et de Fontaine-Étoupefour (Calvados). Les marnes dominent parmi ses sédiments.

Le règne des *Arietites* est fini. En revanche, les *Ægoceras* se montrent (*Æg. Davoei*, *Æg. capricornu*); puis viennent les

zones à *Amaltheus margaritatus* et *Am. spinatus.* Les gryphées se dilatent, comme dans *Gryphæa regularis* (ancienne *G. cymbium* des auteurs), et les bélemnites, notamment *Bel. paxillosus,* abondent au point que l'étage a souvent mérité d'être désigné sous le nom de ***calcaire à bélemnites.***

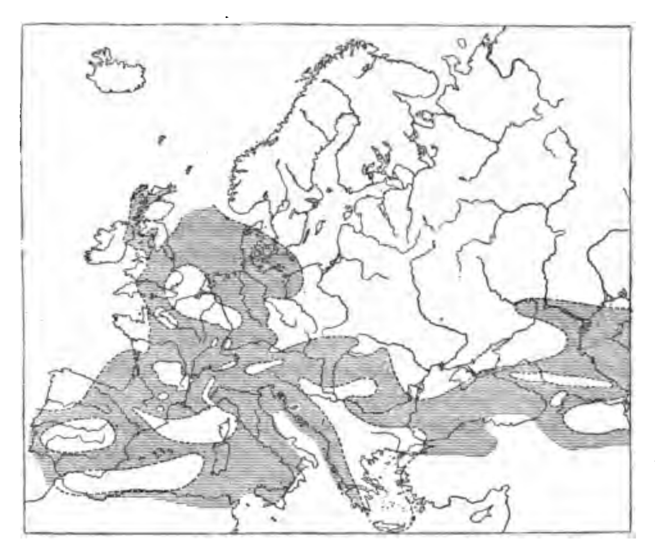


Fig. 85. — L'Europe à l'époque charmouthienne.

Europe extra-alpine. — Formé en Souabe par les marnes et calcaires du lias γ et du lias δ, le charmouthien voit se développer en Lorraine l'assise des *marnes à ovoïdes*, ainsi nommées de grosses concrétions ferrugineuses, et terminée par un épisode gréseux qui se développe dans les Ardennes. De Mézières à Sedan, c'est un calcaire sableux, avec bancs durs, capables de fournir des pavés, qui alternent avec des couches de sable jaune fin.

Le calcaire noduleux, caractérisé par de grandes gryphées, se retrouve en Bourgogne, recouvrant les couches à ciment de Venarey et de Pouilly-en-Auxois, assez riches en bélem-

nites pour qu'on en ait fait le *calcaire à bélemnites*, nom que l'étage mérite encore en Calvados, aux environs de Vieux-Pont. Sur le même horizon se présentent, dans le Berry, des marnes contenant un grand nombre d'ammonites pyriteuses, et, en Angleterre, un grès marneux (*marly sandstone*). Au rebours des étages inférieurs, qui affectaient en Écosse un facies franchement littoral, le charmouthien y reste marneux, nouvelle preuve que les rivages avaient reculé vers l'ouest.

Ce recul s'est produit aussi en Scanie, où le charmouthien est marin, tandis que le facies d'eau douce apparaissait dans les étages précédents.

La même chose a lieu dans la Sarthe, où les couches charmouthiennes s'appliquent sur les divers étages du primaire redressé, en Poitou, où elles recouvrent la granulite, en Vendée, où leur poudingue de base repose sur l'archéen.

Toujours marneux et calcaire sur le revers sud du Plateau Central comme dans le bassin du Rhône, où il contient, comme ailleurs, des plicatules et le *Pecten æquivalvis*, le charmouthien, dans le Briançonnais, est formé de calcaires noirâtres à bélemnites, avec quelques accidents bréchoïdes (*brèche à échinodermes*) et coralligènes, collés à titre de récifs contre les îlots anciens des Alpes.

Province méditerranéenne, Asie, Afrique, Amérique. — La forme méditerranéenne du charmouthien comporte soit des *marnes tachetées*, soit des calcaires comme ceux du Tyrol, où se développe un type nouveau de brachiopodes, très caractéristique de la région pélagique, *Pygope* (*P. Aspasia*). C'est ce facies calcaire qui, continuant la tradition des précédents étages, se montre en Lombardie, dans l'Apennin, en Calabre et en Sicile. Il se poursuit même en Andalousie, mais sans atteindre ni le reste de l'Espagne ni les Baléares, où l'étage reste de type nord-européen.

Les marnes tachetées se poursuivent le long des Carpathes et dans le Tatra. La terre balkanique persistait, mais était longée à l'ouest par une mer passant sur la Bosnie et l'Épire, pour se rendre ensuite en Anatolie, arroser le Caucase et passer sur l'Himalaya.

La mer devait avoir fait des progrès en Algérie; car le charmouthien du Tell y est de type alpin. L'étage s'étend jusqu'aux environs de Figuig.

Enfin, en Bolivie et dans la Cordillère chilienne, les fossiles de l'étage sont les mêmes qu'en Europe.

§ 7

SÉRIE LIASIQUE
5° ÉTAGE TOARCIEN

Données générales sur le toarcien. — Les contours de la mer toarcienne ont à peine différé en Europe de ceux de la mer charmouthienne; si sur quelques points, comme en Ardenne, il y a eu rétrogradation du rivage, sur d'autres, comme en Poitou, il s'est produit un peu d'empiétement. L'étage paraît correspondre à une période de stabilité, pendant laquelle le fond des mers de l'archipel européen n'a guère reçu que des sédiments vaseux, souvent bitumineux. Vers la fin de la période, ces sédiments font place à des dépôts ferrugineux qui prennent la forme oolithique, et au développement desquels il semble que les microorganismes aient dû concourir, en facilitant la précipitation du carbonate de fer amené par les eaux continentales.

C'est la famille des *Harpoceras* qui domine parmi les ammonites du toarcien. D'ordinaire, *Harpoceras* (*Lioceras*) *serpentinum* occupe la base, *Hildoceras bifrons* le milieu et *Lioceras opalinum* le sommet de l'étage. Le genre de bivalve *Posidonia* (*P. Bronni*) y est abondant. Les bélemnites sont encore nombreuses et présentent certaines formes très allongées (*Bel. acuarius*).

Europe extra-Alpine. — En Souabe, le toarcien débute par le lias ε, ou schistes bitumineux à posidonies, avec nombreux restes de reptiles et de poissons ainsi que de végétaux terrestres (conifères et cycadées). Puis, après les marnes du lias ζ, apparaissent les marnes à *Trigonia navis*, que les Allemands ont coutume d'attribuer au jura brun.

La composition est sensiblement la même en Alsace, où

les argiles supérieures se montrent remarquablement fossilifères à Gundershoffen; et les marnes à posidonies continuent à former en Lorraine la base de l'étage; mais, sur le revers occidental du massif vosgien, comme le long du bord de l'Ardenne, se développe au sommet la *limonite oolithique*, activement exploitée aux environs de Nancy et de Longwy. En profondeur, cette limonite devient du carbonate, ce qui donne à penser que la forme sous laquelle se présentent ses affleurements résulte d'une altération postérieure au dépôt.

La même limonite, succédant toujours aux schistes à posidonies, existe en Franche-Comté (Ougney), continuant à accuser des conditions littorales, dues sans doute à une chaîne d'îlots qui, sur l'emplacement des Vosges, empêchait, à la fin du toarcien, la pénétration du facies souabe dans le bassin de Paris. De même, le voisinage du Morvan explique en Nivernais la présence du minerai de fer du toarcien supérieur, à *Rhynchonella cynocephala*.

Essentiellement marneux dans le Berry, ainsi que dans l'Auxois, où il contient à sa base la pierre à ciment de Vassy, près d'Avallon, le toarcien est argileux et calcarifère, avec oolithes ferrugineuses, dans le Poitou. A Thouars, où il est très fossilifère, il débute par un poudingue superposé à l'archéen. Enfin, dans le Bocage normand, on le voit déborder, comme le charmouthien, sur le terrain primaire, formant aux environs de May des flaques fossilifères riches en petits brachiopodes spéciaux (couche à *Leptæna*), d'apparence paléozoïque.

Un terme important du toarcien de Normandie est l'*argile à poissons* de la Caine, célèbre par les *miches* ou grands nodules de calcaire marneux qu'elle contient. Ce sont des concrétions formées autour de restes de sauriens et de poissons, ceux-ci renfermant encore dans leur cavité stomacale de petites ammonites bien conservées. Là aussi se trouvent des débris de céphalopodes encore munis de leur poche à encre.

C'est à l'état d'argile tenace, d'un bleu foncé, que le toarcien se montre en Angleterre; les débris de végétaux terres-

tres, notamment de conifères, y sont fréquents, et à Whitby ils sont transformés en jayet.

On retrouve les schistes bitumineux à jayet et à restes de poissons dans le toarcien inférieur des Causses de la Lozère, ce qui montre bien à quel point les conditions devaient être uniformes au début de l'étage. Par-dessus apparaissent au Larzac 100 mètres de marnes très riches en petites ammonites pyriteuses. Mais le long de la bordure orientale du Plateau Central, la limonite oolithique se montre de nouveau à la Verpillière.

Le lias schisteux à bélemnites de l'Oisans doit appartenir en majorité au toarcien, ainsi qu'une partie des *schistes lustrés* des Grisons.

Province méditerranéenne. Pays hors d'Europe. — Des calcaires gris et rouges à silex représentent le toarcien dans les Alpes bavaroises et, au sud du lac de Come, les calcaires rouges de l'*Ammonitico rosso* renferment une riche faune de cet âge, notamment aux Sette Communi. Il en est de même dans les Alpes Apuanes et l'Apennin. Enfin la faune toarcienne se retrouve à l'île d'Elbe et en Sicile. Quant à la péninsule ibérique, tandis que le facies lombard domine en Andalousie, le reste du pays appartient plutôt au type de l'Europe du nord. La présence de grains roulés de granite et de quartz dans le lias supérieur de Peniche, en Portugal, fait soupçonner un continent atlantique dont le bord oriental passait par les îles Berlengas.

En somme, ce sont des circonstances presque identiques avec celles qui avaient caractérisé le dépôt de l'étage précédent. Et cette analogie se complète par la récente découverte, à Bornéo et à Rotti, des ammonites du toarcien d'Europe, retrouvées aussi à Caracoles en Bolivie et à Copiapo (Chili).

Toutefois, un changement important est en voie de s'accomplir dans l'ancien continent qui si longtemps avait fait une même unité de l'Hindoustan, de l'Australie et de l'Afrique méridionale. Une brèche venant du nord a dû s'y ouvrir et dessiner, entre Madagascar et l'Afrique, un golfe qui ne tardera pas à devenir un détroit; car, à Nossi-Bé, des schistes

charbonneux à végétaux terrestres alternent avec des lits marins à *Lioceras serpentinum.*

§ 8

SÉRIE MÉSOJURASSIQUE
DONNÉES GÉNÉRALES

Généralités sur la période mésojurassique. — A la fin des temps liasiques, la mer s'étendait, dans l'Europe occidentale, aussi loin qu'elle eût jamais été depuis le rhétien. D'autre part, exposées pendant une longue suite de siècles à l'érosion,

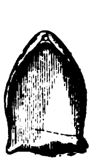


Fig. 86. — *Terebratula (Waldheimia) digona.*



Fig. 87. — *Terebratula (Eudesia) cardium.*



Fig. 88. — *Rhynchonella decorata.*

les îles de l'archipel européen avaient peu à peu perdu leur relief. C'est sans doute à cette cause qu'il faut attribuer la diminution progressive de la sédimentation détritique, et l'avènement d'un nouveau mode de comblement des mers occidentales, où l'activité organique va édifier de puissantes masses calcaires, généralement caractérisées par leur structure *oolithique.*

Mais ce régime ne prévaut que dans l'ouest. Sur la Souabe, encore serrée entre l'île ardennaise et la Bohême, continue à dominer la sédimentation argileuse, et au delà, dans la région baltique, où la mer s'avance plus loin qu'auparavant, se montrent des schistes argileux noirâtres, avec rognons de sphérosidérite, qui vont demeurer la forme normale des dépôts jurassiques dans la province boréale.

Pendant ce temps, la Méditerranée continue à être soumise au même régime que précédemment.

Les mammifères demeurent atrophiés. Parmi les ammonites, on assiste au déclin des *Harpoceras*, puis à l'invasion des *Sonninia*, *Cœloceras*, *Sphœroceras Morphoceras*, qui, à la fin, cèdent la place aux *Oppelia* et *Parkinsonia*. En fait de brachiopodes, on rencontre par millions les *Waldheimia* (fig. 86), *Eudesia* (fig. 87), *Rhynchonella* (fig. 88). Les formes typiques du genre *Trigonia* remplacent les anciennes myophories.

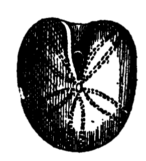


Fig. 89. — *Echinobrissus clunicularis.*

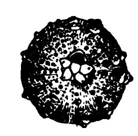


Fig. 90. — *Acrosalenia spinosa.*

C'est à cette époque que se dessine l'essor des oursins, tels que *Echinobrissus* (fig. 89), *Acrosalenia* (fig. 90), *Clypeus*, etc., et des polypiers constructeurs.

La flore est peu riche et contient surtout, avec des cycadées, des fougères de stations élevées et sèches.

La série mésojurassique comprend deux étages : le *bajocien* (de Bayeux), à la base, et le *bathonien* (de Bath en Angleterre) au sommet.

§ 9

SÉRIE MÉSOJURASSIQUE
1° ÉTAGE BAJOCIEN

Données générales sur le bajocien. — Le bajocien du bassin anglo-parisien voit généralement prédominer dans sa constitution le facies des calcaires avec *oolithes ferrugineuses*. C'est l'*inferior oolite* des Anglais, se reliant intimement au toarcien. Certains bancs sont pétris de fragments d'encrines et deviennent le *calcaire à entroques* de la Franche-Comté et de la Bourgogne. D'autres sont particulièrement riches en polypiers. La considération des ammonites permet d'y distinguer les zones suivantes, énumérées de bas en haut :

1, Zone à *Harpoceras* (*Lioceras*) *Murchisonæ*; 2, Z. à *Harp. concavum*; 3, Z. à *Sonninia Sowerbyi*; 4, Z. *à Sphæroceras Sauzei*; 5, Z. a *Sonninia* (*Witchellia*) *Romani*; 6, Z. à *Coeloceras Humphriesianum*; 7, Z. à *Cosmoceras Garantianum*.

Les zones 1 et 2 forment l'*aalénien* (d'Aalen en Souabe).

France et Angleterre. — Le type du bajocien se trouve dans *l'oolithe ferrugineuse*, si remarquablement fossilifère, des environs de Bayeux et de Caen, qui repose sur un calcaire à silex dit *mâlière*. C'est l'équivalent de *l'inferior oolite* d'Angleterre, remplacée dans le Yorkshire par un grès ferrugineux à grosses concrétions (*Dogger*), que surmontent à Scarborough des grès et schistes charbonneux à fougères et cycadées, également développés à Skye en Écosse.

Le facies calcaire domine dans le bajocien de la Lorraine, de la Franche-Comté et de la Côte-d'Or, où sur les hauteurs, le *calcaire à entroques* donne lieu à des escarpements ruiniformes très caractéristiques, couronnant comme autant de vieilles forteresses les talus réguliers des marnes toarciennes. C'est aussi la plate-forme bajocienne qui constitue le remarquable promontoire connu sous le nom de plateau de Langres. Contre la barrière que devaient former les îlots vosgiens, les polypiers ont édifié de vrais récifs. C'est par des calcaires jaunes, parfois oolithiques et exploités comme pierre de taille, que le bajocien est représenté dans les Ardennes. Encore spathique, c'est-à-dire lamellaire, dans le Berry, il se transforme vers l'ouest en calcaires à silex.

Mais, quand on descend de la Franche-Comté vers le sud, on voit apparaître un autre facies, celui des calcaires avec empreintes d'algues marines ou fucoïdes, dites *Cancellophycus*, qui se poursuit dans la vallée du Rhône jusqu'en Provence. En même temps, on constate que la mer bajocienne, ne laissant subsister dans les Cévennes que de petits îlots, a débordé les assises du lias et s'est étendue sur le Plateau Central jusqu'à l'emplacement des sources de la Loire.

Régions diverses. — Un calcaire rouge et blanc, avec crinoïdes, est la forme du bajocien dans les Alpes orientales. A ce calcaire se relie l'oolithe du lac de Garde, où les *Phylloceras* et *Lytoceras* annoncent un facies méditerranéen qui se poursuit sur l'Apennin, la Calabre, la Sicile, l'Andalousie, tandis que l'Espagne et le Portugal suivent plutôt le régime des mers françaises.

En revanche, le régime pélagique prévaut sur les Carpathes et se fait sentir jusqu'au Caucase.

C'est à partir de la Silésie qu'on voit se développer, à la hauteur du bajocien, les argiles à nodules de sphérosidérite, avec *Inoceramus polyplocus*, qu'on retrouve également dans le nord de la Westphalie. Ce facies septentrional s'étend à la Pologne et on en retrouve des traces dans le sud de la Russie, tandis que la Crimée fait partie de la province méditerranéenne.

On manque encore de données précises sur le bajocien asiatique. En revanche, on peut affirmer qu'à cette époque la séparation de l'Afrique et de Madagascar s'accentuait. La côte occidentale de la grande île laisse voir des fossiles du bajocien d'Europe, et ces affleurements peuvent être reliés, par l'Abyssinie, à ceux que la même mer a laissés sur le nord de l'Afrique, notamment aux environs de Figuig.

La même invasion s'est fait sentir sur l'Australie occidentale, jusqu'alors indemne de toute incursion marine d'âge secondaire.

Notons enfin que le bajocien est bien développé dans la Cordillère entre l'Argentine et le Chili, où l'on trouve le même *Cœloceras Humphriesianum* qu'en Normandie; tant était grande encore, à cette époque, l'aire d'habitat d'une espèce d'ammonite.

§ 10

SÉRIE MÉSOJURASSIQUE
2° ÉTAGE BATHONIEN

Données générales sur l'étage bathonien. — La géographie de l'Europe à l'époque bathonienne n'a différé que par de menus détails de ce qu'elle était lors du bajocien. Il y a pourtant, dans les régions du nord, tendance au progrès de la mer; c'est ainsi que, sur le bord méridional de l'Ardenne, on voit le bathonien s'appliquer directement sur le terrain primaire; et les sondages enseignent que le même fait se reproduit en Normandie comme dans le sud-est de l'Angleterre. La mer gagne du terrain dans la direction de la Russie et de la mer du Nord (fig. 91). Mais dans le bassin anglo-parisien, le contact du bathonien en transgression ne se fait pas par des

conglomérats marquant une invasion violente. Au contraire, le régime calcaire s'installe presque partout d'une façon immédiate. Les polypiers sont à l'œuvre depuis l'Argovie jusqu'au cœur de l'Angleterre, et travaillent avec les crinoïdes à la construction de masses généralement blanches, où dominera le grain oolithique. A aucune autre époque, dans le bassin en question, la part de la sédimentation *terrigène*, c'est-à-dire

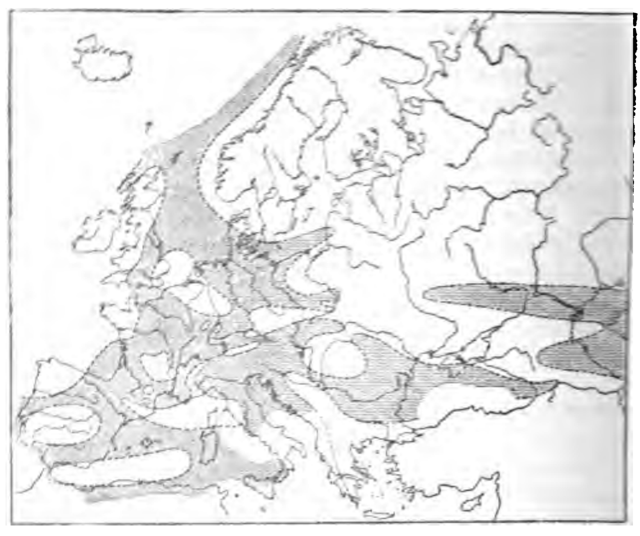


Fig. 91. — L'Europe à l'époque bathonienne.

alimentée par des débris de la terre ferme, n'a encore été plus réduite au profit des influences *zoogènes*.

En Angleterre, où la classification du jurassique a été pour la première fois établie, on distinguait à la base une assise argileuse, dite *terre à foulon* (*fuller's earth*). Au-dessus venait la *grande oolithe* de Bath, recouverte par l'ensemble de l'*argile de Bradford*, du calcaire dit *Forest-marble*, et de l'assise oolithique appelée *corn-brash*.

Si l'équivalent de la terre à foulon peut être reconnu comme

sous-étage *vésulien* (des marnes de Vesoul), il est difficile de séparer les trois autres termes, qui peuvent former le *bradfordien*.

Trois zones d'ammonites se partagent le bathonien : en bas la zone à *Parkinsonia Parkinsoni*, ensuite la zone à *Oppelia fusca;* enfin celle à *Oppelia aspidoïdes*. Les *Sphæroceras* et *Morphoceras* jouent encore un rôle dans cet ensemble où d'ailleurs, en raison de l'origine coralligène des sédiments, les ammonites sont beaucoup moins fréquentes que dans le bajocien.

Le bathonien de la Souabe à l'Écosse. — La Souabe ne bénéficie pas encore du régime calcaire. Au contraire, le sommet de son *jura brun* consiste en couches d'argiles avec fossiles pyriteux ou siliceux, qui contiennent en haut *Rhynchonella varians*, et qui, dans le nord-ouest de l'Allemagne, deviennent des argiles sableuses micacées.

Mais, dès l'Argovie, on voit apparaître la *grande oolithe*, qui se développera de plus en plus à l'ouest et deviendra partout le terme essentiel du bathonien. Seulement, dans ces régions de l'est, y compris l'Alsace, la grande oolithe est à la base du bathonien; tandis que, plus à l'ouest, elle en occupera la partie moyenne, comme elle fait dans la Franche-Comté, la Lorraine et les Ardennes. Là, le bathonien inférieur est formé par les marnes de Vesoul à *Ostrea acuminata*, parfois développées à l'état de calcaire jaune, mélangé d'oolithes argileuses, à *Clypeus Ploti*.

La *grande oolithe*, généralement blanche, et terminée par un lit à *Rhynchonella decorata*, varie de 40 à 80 mètres de puissance. On juge bien de son développement aux environs de Chaumont, où elle est compacte et presque sans fossiles.

Un fait intéressant se produit au Boulonnais, où la base du bathonien calcaire est une couche de sables argileux avec lignites. Ici donc la transgression marine, qui a amené la mer bathonienne sur le bord du massif ancien de l'Ardenne et du Brabant, a été si graduelle, qu'elle a respecté, malgré son peu de consistance, le dépôt continental d'estuaire qui l'avait précédée.

En Angleterre, il y a lieu de distinguer, comme dépendance du bathonien inférieur, le schiste de Stonesfield, riche en

restes de petits mammifères. Ajoutons que, sur le Yorkshire et l'Écosse, les dépôts bathoniens affectent un caractère littoral très prononcé.

Bassin de Paris. Causses. — Une bande importante de bathonien forme en Normandie la plaine de Caen. L'assise inférieure est le *calcaire de Caen*, à ossements de reptiles marins, et renommé pour la finesse de son grain comme pour sa résistance aux agents atmosphériques, qu'affirme le bel état de conservation des cathédrales normandes. La grande oolithe, dite *miliaire* à cause de sa texture, est tantôt à lamelles spathiques, tantôt compacte et à silex. Les bancs qui terminent le bathonien (Ranville, Lion-sur-Mer, Luc, Langrune) sont extrêmement riches en fossiles, notamment en brachiopodes et en bryozoaires; et tout cet ensemble atteste à quel point l'activité coralligène était alors développée, puisque ici, et contrairement à ce qui avait lieu dans le nord et l'est, la masse entière de l'étage est exempte d'argile.

La belle pierre de Chauvigny, près de Poitiers, appartient au bathonien, comme aussi la pierre d'Apremont en Berry. En approchant du Morvan, entre ce massif et les contreforts des Vosges, on voit se développer à la base de l'étage le facies plus vaseux du *calcaire marneux blanc jaunâtre*, supportant une belle masse de calcaires oolithiques, dont font partie en Bourgogne les excellentes pierres de Ravières et de Comblanchien.

Ainsi tout le bassin dit de Paris, à l'époque bathonienne, s'est garni d'importants massifs calcaires, qui descendent aussi dans la vallée de la Saône. Un régime analogue édifiait, sur les Causses, les épaisses assises de calcaires et de dolomies où sont creusés les canyons du Tarn. Mais, sur le revers sud-ouest du Plateau Central, des symptômes d'émersion sont accusés par de petites couches d'eau douce, avec lignites, qui viennent s'intercaler au sommet de l'étage.

Région méditerranéenne. — La forme alpine, ou plutôt méditerranéenne, du bathonien est réalisée par les calcaires marmoréens, souvent rouges, de Klaus près d'Hallstatt. *Posidonia alpina* y abonde, et c'est un *Lytoceras* (*L. tripartitum*) qui devient l'ammonite dominante. Mais parfois les calcaires

sont gris ou rouges, avec silex, et ne contiennent en fait de fossiles que des *Aptychus* (organes internes d'ammonites).

Le facies de Klaus se retrouve au lac de Garde, dans l'Apennin central, en Calabre, en Andalousie, mais n'atteint pas le reste de l'Espagne, encore soumis comme précédemment au même régime, moins pélagique, que la région française. En revanche la faune de Klaus pénètre partiellement dans la zone subalpine des Alpes occidentales et dans les Alpes bernoises.

C'est aussi le type de Klaus, avec posidonies, qu'on retrouve près de Vienne, dans les Carpathes et en Crimée.

Asie, Afrique, régions arctiques. — Le golfe de Catch, dans l'Inde, garde les traces d'une incursion, sur la terre de Gondwana, de la mer bathonienne qui, au même moment, baignait l'Abyssinie, la terre des Somalis, le bord oriental de l'Afrique australe, s'étendant aussi sur la moitié de Madagascar. C'est la dislocation de l'ancienne terre tropicale qui se complète. Il est assez remarquable que, dans tous ces gisements, la faune soit beaucoup plus voisine de celle de l'Europe occidentale que de la faune méditerranéenne; ce qui se comprend, tous ayant dû se former à une distance peu considérable d'un rivage.

Notons enfin que le Groenland oriental et la terre François-Joseph ont été visités par la mer bathonienne, qui a laissé en ces pays des fossiles, tels que *Pseudomonotis echinata*, qu'on est accoutumé à rencontrer dans les gisements normaux de l'étage en Europe. Ces régions arctiques, que les mers du lias avaient respectées, vont subir une invasion marine de mieux en mieux prononcée avec le temps.

§ 11

SÉRIE NÉOJURASSIQUE
DONNÉES GÉNÉRALES

Généralités sur la série néojurassique. — C'est pendant la période néojurassique que s'est complété le remplissage sédimentaire des bras de mer de l'archipel européen. Aussi, à la

fin de cette phase des temps géologiques, s'est-il prononcé, dans la partie atlantique de l'Europe, une émersion générale, tandis qu'au contraire la mer s'épanouissait assez largement entre l'Europe et l'Asie septentrionale. Avec ce phénomène final coïncide la première apparition des plantes dicotylédones angiospermes. On assiste également au recul vers le sud des constructions coralligènes, qui plus tard feront entièrement défaut hors de la région méditerranéenne.



Fig. 92. — *Pterodactylus elegans.*

Les mammifères continuent à être atrophiés. Les ptérosauriens prennent leur essor, représentés par des lézards volants, tels que *Pterodactylus* (fig. 92). Un nouveau progrès des vertébrés est annoncé, à la fin, par l'apparition d'*Archæopteryx* (fig. 93), oiseau de petite taille, à affinités reptiliennes très accusées. C'est aussi à ce moment que se montrent les premières tortues et que les dinosauriens terrestres atteignent leurs plus grandes dimensions. Tels ces animaux fantastiques des Montagnes Rocheuses, *Atlantosaurus*, *Brontosaurus*, etc., dont quelques-uns avaient près de 30 mètres de long. Tel aussi l'*Iguanodon* (fig. 94) de nos contrées.

Les bélemnites à long sillon et à forme lancéolée (fig. 95) sont nombreuses. Les genres d'ammonites dominants deviennent *Perisphinctes*, *Macrocephalites* (fig. 96), *Reineckeia*, *Peltoceras*, *Cardioceras* (fig. 97), *Creniceras* (fig. 98), *Aspidoceras*, *Neumayria* (fig. 99), et, à la fin, *Holcostephanus*.

Les chamidés font leur apparition avec *Diceras* (fig. 100), dont le test épais s'accommode spécialement des conditions propres aux récifs coralliens, ce qui est aussi le cas des *Nerinæa* (fig. 101).

Il y a de nombreuses huîtres, notamment de petites exogyres (fig. 102).

Un type spécial de térébratules, les *Pygope* (fig. 103), dont les expansions latérales se rejoignent de manière à simuler un trou central (térébratules perforées), se développe dans la région méditerranéenne, dont il devient caractéristique. A côté des polypiers constructeurs, encore très nombreux, prospèrent les oursins, tels que *Cidaris* (fig. 104), *Hemicidaris*, *Glypticus*.

Quant à la flore, elle correspond à l'apogée des cycadées, comme *Zamites* (fig. 105) et l'on y voit débuter les cyprès ainsi que les sequoias. Mais, dans son ensemble, elle est pauvre, monotone et paraît avoir été peu appropriée à la nourriture des animaux, ce qui explique la rareté des herbivores. C'est à la fin de la période que se montrent les premières dicotylédones angiospermes, accompagnées de monocotylédonées.



Fig. 93. — *Archæopteryx lithographica*. *a*, plaque décrite par Oven; *b*, aile; *c*, patte.



Fig. 94. — Dent d'*Iguanodon Mantelli*.

La présence de récifs coralliens jusqu'au 55e degré de lati-

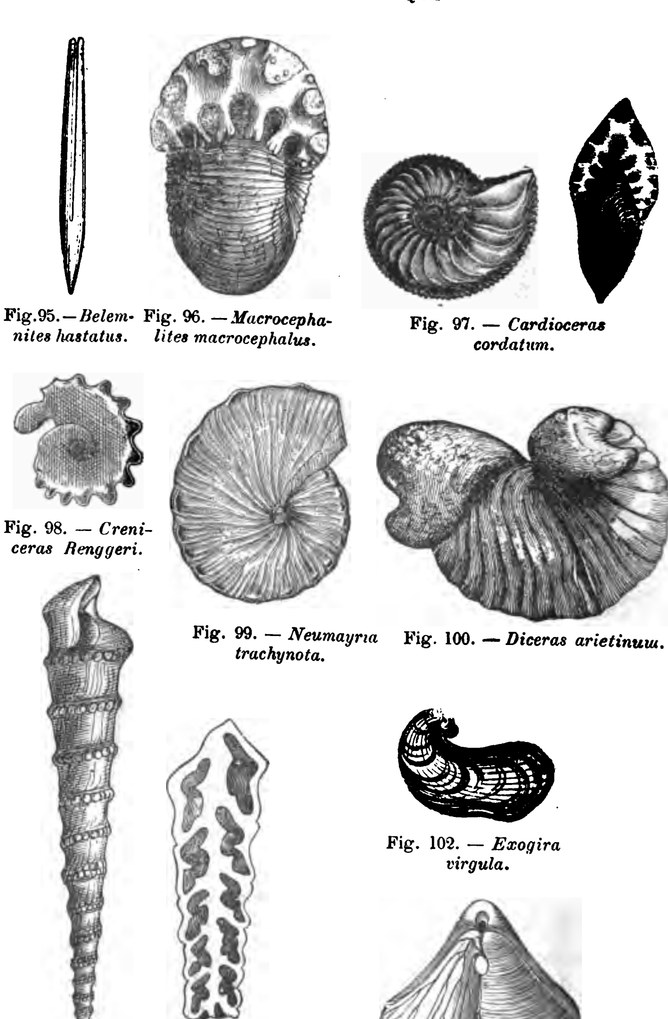


Fig. 95. — *Belemnites hastatus.*

Fig. 96. — *Macrocephalites macrocephalus.*

Fig. 97. — *Cardioceras cordatum.*

Fig. 98. — *Creniceras Renggeri.*

Fig. 99. — *Neumayria trachynota.*

Fig. 100. — *Diceras arietinum.*

Fig. 101. — *Nerinæa tuberculosa.*

Fig. 102. — *Exogira virgula.*

Fig. 103. — *Terebratula (Pygope) diphya.*

tude, et l'existence d'une végétation d'apparence tropicale sous le 71[e] parallèle, attestent à quel point les différences devaient être peu sensibles dans la distribution des conditions physiques.

Divisions de la série néojurassique. — La division des temps néojurassiques est inspirée de l'ancienne nomenclature anglaise. Au-dessus des calcaires bathoniens, on distinguait en Angleterre une assise argileuse, l'*argile d'Oxford* (*Oxford-clay*), avec le *Kelloway-rock* à la base. D'Orbigny a fait de cette dernière son étage *callovien*, surmonté par l'*oxfordien*. A l'épisode argileux avait succédé une reprise partielle et sporadique des constructions calcaires, exprimée par le *coral-rag* des Anglais. Puis les apports argileux étaient revenus avec le *Kimeridge-clay*, jusqu'au jour où l'émersion du bassin anglais s'était traduite par le dépôt des *couches de Portland*, surmontées elles-mêmes par la série lacustre dite de *Purbeck*.



Fig. 104. — Radiole de *Cidaris florigemma*. Fig. 105. — *Zamites Moreanus*.

Le *corallien* a été créé pour correspondre au coral-rag; mais on s'est aperçu bientôt que le retour du facies coralligène ne s'était pas produit partout à la même époque, tout en ramenant, quand il se manifestait, des associations de formes, et notamment d'échinides, très difficiles à distinguer les unes des autres. On préfère employer la dénomination d'étage *séquanien*. Le *Kimeridgien* répond à la majeure partie du Kimeridge-clay, dont le sommet, avec les couches de Portland, forme le *portlandien*. L'équivalent méditerranéen du portlandien est le *tithonique*.

§ 12

SÉRIE NÉOJURASSIQUE
1° ÉTAGE CALLOVIEN

Données générales sur l'époque callovienne. — Dès le début de l'époque callovienne, une différence tranchée s'in-

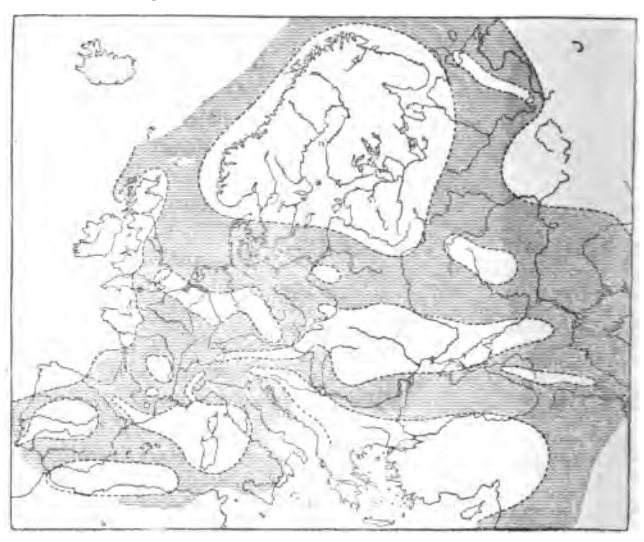


Fig. 106. — L'Europe à l'époque callovienne.

troduit entre le nord et le sud-ouest de l'Europe. Au midi de la vallée de la Loire, le régime bathonien persiste; de nouvelles masses calcaires s'ajoutent sans interruption aux précédentes, dans le Poitou comme en Berry. Au contraire, en Angleterre comme le long de l'Ardenne et en Lorraine, les constructions de ce genre sont interrompues, et la sédimentation devient franchement argileuse. Les céphalopodes reparaissent, amenant, en fait d'ammonites et de bélemnites, des types nouveaux, dont l'origine doit être cherchée dans le nord.

En effet, le gain de la mer sur l'Europe du nord-est, qui s'était déjà fait sentir avec le bathonien, se prononce de plus en plus. Le massif scandinave et finlandais est entouré par la mer (fig. 106), dont un bras, passant sur la Russie orientale, unit largement les eaux européennes avec une mer polaire, où prospèrent les grosses bélemnites, ainsi que les ammonites des genres *Cadoceras*, *Macrocephalites*, *Cardioceras* (*Quendstedticeras*). C'est le maximum d'amplitude que les eaux marines aient atteint en Europe, et cette *transgression callovienne* est si accusée qu'on a pu être parfois tenté d'en exagérer la signification, quand on ne connaissait pas encore les étapes préalables qui l'avaient successivement préparée en divers points.

Le callovien, tel qu'on le comprend aujourd'hui, c'est-à-dire avec adjonction d'une partie de l'ancien *Oxford-clay*, se divise en quatre zones d'ammonites. La première est caractérisée par *Macrocephalites macrocephalus*; dans la seconde dominent *Reineckeia anceps* et *Stephanoceras coronatum*; la troisième est la zone à *Cardioceras Lamberti* et *Peltoceras athleta*; enfin la quatrième voit dominer *Cardioceras Mariæ*. Ces deux dernières ensemble forment le *divésien* (de Dives au Calvados).

Europe septentrionale. — Ainsi que nous l'avons dit, le fait saillant de l'époque callovienne est le changement qui s'opère dans les régions du nord-ouest de l'Europe où, durant le bathonien moyen, l'activité coralligène s'était donné libre carrière jusqu'au cœur de l'Angleterre. On voit d'abord se former, du Jura et de la Lorraine aux Ardennes, des calcaires en plaquettes oolithiques avec nombreuses valves d'huîtres (*dalle nacrée*); puis apparaît une oolithe ferrugineuse à gangue argileuse (minerai de Poix), formation littorale avec laquelle les ammonites reviennent en abondance. Enfin se dépose l'argile franche à *Gryphæa dilatata*, terminée par une assise dure d'un grès argilo-siliceux ou *gaize*, à *Cardioceras Mariæ* et *Ostrea gregaria*; cette dernière assise, grâce à sa résistance, formant à son affleurement le rempart des *crêtes de Poix*.

Le facies argileux qui s'introduit ainsi règne, dès le callo-

vien le plus inférieur, en Souabe et en Angleterre; en Souabe, où se dépose l'*argile à Ornati*, ainsi nommée de la famille d'ammonites qui domine à ce niveau, en Angleterre dans l'*Oxford-clay*, avec la couche rognonneuse de sa base (*Kelloway-rock*), où se rencontrent, en compagnie des *Cosmoceras* et *Macrocephalites*, de nombreux squelettes d'ichthyosaures et de plésiosaures. Le même facies apparaît au Boulonnais, ainsi que dans les falaises du Calvados.

L'influence septentrionale se trahit par les grosses bélemnites (*B. Oweni*), qu'on trouve à ce niveau dès le Boulonnais, et dont la fréquence augmente dans le Yorkshire. Les mêmes bélemnites se rencontrent en Pologne et, quand on arrive aux environs de Moscou, on les trouve, avec les ammonites caractéristiques de l'étage, dans des argiles de couleur foncée, toujours très peu épaisses. La transgression se manifeste par le fait que les diverses zones peuvent se déborder les unes les autres, en s'appuyant directement sur le carboniférien.

Enfin on sait aujourd'hui que la même faune d'ammonites et de bélemnites habite les argiles noires du cap Flora, dans la terre de François-Joseph. Le caractère septentrional de ce type n'est donc pas douteux.

Régions françaises diverses. — Cependant l'influence du nord diminue assez vite quand on s'éloigne de la Franche-Comté. Tandis que le callovien inférieur reste à l'état d'oolithe ferrugineuse, son sommet revêt la forme de marnes à concrétions siliceuses, dites *chailles*, pour devenir, en Nivernais, le calcaire blanc à silex de Pougues, en attendant que le Berry et le Poitou ramènent des masses de calcaire blanc oolithique, succédant sans discontinuité apparente aux calcaires bathoniens (pierre de Lourdines près Poitiers). Cette continuité est d'autant plus curieuse, que précisément en ces points la zone paléontologique inférieure du callovien paraît complètement absente.

C'est en remontant du Poitou vers le nord, le long du massif armoricain, qu'on assiste à une transformation inverse, d'abord dans les oolithes ferrugineuses si fossilifères de Montreuil-Bellay et de Pécheseul, ensuite dans les calcaires mar-

neux du Merlerault. Ceux-ci sont nettement transgressifs sur les diverses assises du bathonien, ce qui indique que la période callovienne a été inaugurée dans le nord par des mouvements de l'écorce, suffisants pour expliquer l'arrêt des constructions coralliennes.

Au sud du massif vosgien, l'étage est surtout marneux, et essentiellement caractérisé par les *marnes à ammonites pyriteuses* (*Creniceras Renggeri*) du Jura. Mais, dans le Jura méridional, commence à apparaître la faune méditerranéenne, qui se développe dans les marnes noires à *Posidonia Dalmasi* des Basses-Alpes, si facilement ravinées par les torrents. Ici c'est le synclinal subalpin, qui continue à se garnir de dépôts vaseux, tandis qu'au même moment, contre le rivage du Plateau Central, se dépose en face l'oolithe ferrugineuse de la Voulte, si riche en ammonites de la zone à *Reineckeia anceps*. Là aussi, l'absence locale de diverses zones accuse des variations dans le niveau de la mer.

Région méditerranéenne. Asie, Afrique, Amérique. — Le callovien est marneux en Portugal, où sa faune offre, avec la province méditerranéenne, des affinités que marque l'abondance des *Phylloceras*. Le peu que l'on connaît de l'étage, dans les Apennins et les Alpes méridionales, indique la persistance du type calcaire, depuis si longtemps propre à cette province méridionale.

Les affinités méditerranéennes se révèlent encore en Crimée et au Caucase, tandis que, sur la rive orientale de la Caspienne, c'est le type de l'Europe occidentale qui reparaît; et pareille chose a lieu en Syrie.

La mer callovienne a passé sur la Boukkarie, le Baloutchistan et l'Himalaya, semant dans cette contrée des couches à *Belemnites Gerardi*, qu'on retrouve à Timor comme dans les Moluques, en même temps que des ammonites de type européen existent en Nouvelle-Guinée et en Australie occidentale.

Mais un bras de cette mer asiatique devait se détacher de Perse pour mordre au golfe de Catch sur la terre de Gondwana, et continuer vers le sud, entre l'Abyssinie et Zanzibar, d'un côté, Madagascar de l'autre. Les *Macrocephalites* et *Cosmo-*

ceras ont été recueillis dans cette île. En contournant le nord de l'Égypte, le bras de mer en question se reliait à la Méditerranée, qui submergeait aussi le nord de l'Algérie.

D'autre part, la mer boréale, passant sur l'Alaska, débordait en transgression sur la Californie, peut-être même sur le Wyoming.

Quant à l'Amérique du Sud, elle laisse voir à Caracoles en Bolivie, comme au Chili et en Argentine, les couches à *Macrocephalites* et à *Reineckeia*, dont la faune est liée à la fois à celle de l'Europe et à celle de l'Inde. Comme d'ailleurs le callovien des Andes méridionales semble s'être déposé dans un golfe étroit, fermé au sud, c'est vers le nord, en contournant le massif du Brésil et la Colombie, que paraît devoir être cherchée la communication du Pacifique méridional avec la Méditerranée européenne; communication que masquerait aujourd'hui la dépression des Antilles.

§ 13

SÉRIE NÉOJURASSIQUE
2° ÉTAGE OXFORDIEN

Données générales sur l'oxfordien. — Avec l'époque oxfordienne se prépare, dans le nord-ouest de l'Europe, le retour des conditions qu'avait interrompues l'établissement du régime vaseux. Encore argileuse au début, la sédimentation se clarifie peu à peu et finit par permettre en certains points la reprise des constructions coralliennes, tandis qu'en d'autres domine le facies des marnes calcaires riches en spongiaires.

L'oxfordien peut être partagé en deux sous-étages : à la base, le *neuvizyen*, de Neuvizy aux Ardennes, ou zone à *Cardioceras cordatum*; au sommet l'*argovien* (de l'Argovie) ou zone à *Perisphinctes Martelli* et *Ochetoceras canaliculatum*. *Peltoceras transversarium*, développé surtout dans la région méditerranéenne avec les *Phylloceras* (*P. tortisulcatum*), est plutôt concentré dans le sous-étage inférieur. C'est dans l'oxfordien que prospère *Belemnites hastatus*.

Europe septentrionale et régions boréales. — L'oxfordien, tel qu'il est ici compris, doit embrasser en Angleterre, avec la partie supérieure de l'*Oxford-clay*, l'assise du *grès calcaire inférieur*, qui marque par sa constitution un changement sensible de la sédimentation. Même il peut être convenable d'y faire rentrer aussi l'oolithe corallienne (*coralline oolite*) d'Osmington, qui par ses ammonites est au moins à cheval sur l'oxfordien et le séquanien, et trouve son équivalent en Normandie, près de Trouville, au sommet de l'oxfordien marneux.

Du reste, dans les Ardennes françaises, les assises régulières à polypiers, oursins et nérinées, dont on avait sans hésitation fait l'équivalent de l'ancien *corallien*, se rattachent par leurs ammonites (*Perisphinctes Martelli*) à l'argovien, étant d'ailleurs immédiatement superposées au minerai oolithique de Neuvizy à *Cardioceras cordatum*. Cette conclusion s'applique au *glypticien* de la Meuse, ou calcaire oolithique à oursins de l'espèce *Glypticus hieroglyphicus*, qu'on voit passer latéralement à un facies vaseux avec *Ochetoceras canaliculatum*.

Dès la Côte-d'Or apparaissent, à cette hauteur, les *marnes à spongiaires*, bien développées de l'Armançon à l'Yonne, et se fondant insensiblement vers le bas avec les couches à *Cardioceras cordatum*. Mais ces dernières sont souvent très rudimentaires et il y a certainement des lacunes dans la série.

Le facies à spongiaires s'étend sur tout le Berry et va jusqu'en Poitou; après quoi l'apparition d'argiles et de sables roussâtres gréseux (Courtomer) prépare le facies normand et anglais.

En Franche-Comté, les marnes à *Creniceras Renggeri*, dont nous avons parlé à propos du callovien, empiètent en partie sur l'oxfordien et supportent des calcaires marneux, avec spongiaires à la base, que recouvrent les calcaires de l'étage suivant.

En raison de la prédominance des éléments argileux, l'oxfordien de Franche-Comté a moins bien résisté à l'érosion que les calcaires bathoniens et rauraciens, entre lesquels il est intercalé. Aussi de nombreuses dépressions ou *combes* y sont-elles creusées, dominées à droite et à gauche par des *crêts* ou

crêtes en calcaire. Ces combes sont occupées par des prairies et le sommet de l'oxfordien sert de surface d'émergence aux eaux qui ont circulé à travers les calcaires.

Les calcaires marneux à spongiaires, dont nous avons parlé, établissent le passage de l'oxfordien franc-comtois au facies typique des *couches de Birmensdorf* ou *spongitien* d'Argovie, qui dénote des conditions spéciales de sédimentation et de vie marine. Ces couches sont surmontées par les *marnes d'Effingen*, à *Waldheimia impressa*, équivalent des *argiles à impressa* de la Souabe. Ces dernières deviennent de plus en plus calcaires vers le haut et préparent l'avènement du *Jura blanc*. Mais l'élément calcaire diminue au voisinage de la Bohême, envahie par la mer oxfordienne, qui a laissé, près des sources de l'Elbe, des marnes noires, souvent bitumineuses, à *Ochetoceras canaliculatum*.

La mer passait sur la Pologne et déposait en Russie, comme à l'époque précédente, de minces couches d'argiles noires à concrétions, avec nombreux *Cardioceras* et bélemnites (*B. Panderi*) de type boréal. Un genre nouveau de bivalves, *Aucella*, fait son apparition à cette hauteur et deviendra caractéristique du néojurassique dans les régions voisines du cercle polaire. Le Spitzberg, jusqu'alors émergé depuis le trias, s'est laissé envahir par la mer de l'oxfordien supérieur, qui au même moment s'étendait sur la Nouvelle-Zemble.

Région méditerranéenne. Afrique. Inde. Amérique. — Dans la vallée du Rhône et ses dépendances, l'oxfordien est à l'état de calcaires marneux, à *Phylloceras tortisulcatum*, se changeant dans les Hautes-Alpes en marnes noires, intimement liées à celles du callovien. Plus au sud, cet ensemble est dolomitique. Au contraire, dans le voisinage des Alpes suisses, l'oxfordien trouve sa place dans les barres calcaires du *malm*, comme aussi, dans l'Oberland, à la base du *calcaire des hautes montagnes*.

Le régime méditerranéen s'étend à l'Algérie, où les assises à *Phylloceras tortisulcatum* sont tantôt argileuses, tantôt à l'état de calcaires rouges à silex. Comme précédemment, la mer passait d'Algérie en Syrie, puis sur l'Afrique orientale et à Madagascar, où les environs de Tulléar montrent un calcaire

oolithique à *Perisphinctes Martelli*. Elle envoyait un de ses bras jusqu'à Catch en Hindoustan.

Il est probable qu'il y a lieu de rapporter à l'époque oxfordienne l'invasion marine tout à fait exceptionnelle qui s'est produite dans l'Amérique du Nord, amenant un golfe du Pacifique jusqu'au cœur de la région des Montagnes Rocheuses. Les traces en sont restées sous la forme de calcaires sableux, de grès et d'argiles à *Cardioceras*, avec *Belemnites densus*, directement superposés aux *red beds* du permien ou du trias, tandis qu'ils supportent les couches à grands dinosauriens du jurassique tout à fait supérieur.

Cette invasion a été de courte durée, et les vestiges qu'elle a laissés, depuis la Colombie britannique jusqu'aux Black Hills et au fleuve Colorado, sont caractérisés par une faune très uniforme, mais dont l'âge précis demeure, jusqu'à nouvel ordre, assez difficile à affirmer.

§ 14

SÉRIE NÉOJURASSIQUE
3e ÉTAGE SÉQUANIEN

Données générales sur le séquanien. — C'est pendant l'époque séquanienne que les eaux marines de l'Europe septentrionale ont peu à peu et pour toujours perdu le privilège des constructions coralliennes, pendant que s'y préparait le retour de la sédimentation argileuse. Au début, les vrais récifs se montrent encore, au moins par places, jusque dans le Yorkshire; mais, quand la période s'achève, il faut, pour en rencontrer, redescendre jusque dans la Haute-Marne. Ici encore, l'argile n'apparaît qu'au nord, et dans toutes les régions du midi, bassin de la Loire, bassin du Rhône ou Aquitaine, on ne voit que des calcaires, tantôt plus ou moins marneux, tantôt à grain lithographique, c'est-à-dire résultant de la consolidation d'une vase calcaire très fine.

Deux sous-étages se partagent le séquanien : l'inférieur ou *rauracien* (de l'ancien nom latin de la région jurassienne) est la zone à *Peltoceras bimammatum*, où commence à se montrer

Perisphinctes Achilles; dans le sous-étage supérieur, appelé *astartien*, à cause de la fréquence des bancs pétris de petites coquilles bivalves du genre *Astarte*, *Perisphinctes Achilles* prévaut, en compagnie du brachiopode *Zeilleria humeralis*. Dans la région méditerranéenne, cette dernière zone, se fondant en haut avec l'étage suivant, voit le début d'une autre ammonite spéciale à la région, *Oppelia tenuilobata*.

C'est aussi avec le séquanien que coïncide l'apparition de l'importante famille des chamidés, représentés par le genre *Diceras*, toujours cantonné au voisinage immédiat des récifs.

Angleterre, Normandie, Boulonnais. — Le *coral-rag* anglais, calcaire bréchiforme, presque entièrement composé de polypiers, de coquilles brisées et d'oursins, notamment de *Cidaris florigemma*, passe pour le type du rauracien. Il se pourrait cependant que la considération des ammonites infirmât cette assimilation, en faisant rentrer le coral-rag dans l'argovien; auquel cas le séquanien serait représenté par le *grès calcaire supérieur*, à *Cardioceras alternans*. La présence, dans cette assise, de *Belemnites nitidus* trahit le voisinage de la province boréale.

De la même façon, au coral-rag de Trouville succède un calcaire jaunâtre à silex, avec *Perisphinctes*, que surmontent des argiles également pourvues de *Bel. nitidus*. La même série est extrêmement variable dans le Boulonnais, où l'élément argileux s'y intercale à plus d'une reprise, le principal fossile étant une grande huître plate, *Ostrea deltoidea*.

De la Lorraine à la Normandie par le Berry. — La formation se régularise en Lorraine, où elle engendre la belle oolithe corallienne à *Diceras* de Saint-Mihiel, ainsi que les assises à entroques qui donnent les pierres estimées d'Euville et de Lérouville. Ce facies oolithique finit dans la Haute-Marne, où domine, à la même hauteur, un calcaire marneux à *Peltoceras bimammatum*. Ce calcaire s'est formé sur le passage de courants, chargés de vase corallienne fine, qui s'établissaient entre le bassin de Paris et celui du Rhône, tandis que les assises oolithiques se constituaient en bordure des récifs appuyés contre l'Ardenne et les îlots vosgiens.

En effet, dès qu'on approche du Morvan, on voit la tendance

oolithique se manifester à plusieurs reprises, notamment au sommet du séquanien, dans la pierre de Tonnerre, et mieux encore dans l'Yonne, à la hauteur du rauracien, représenté par les beaux calcaires oolithiques à *Diceras* et nérinées de Châtel-Censoir, Coulanges-sur-Yonne et Merry-sur-Yonne.

Il n'en est plus ainsi dans le Berry, où, sauf la pierre de Bourges et celle de Sancerre, accidents coralligènes du séquanien supérieur, on ne voit que calcaires marneux et calcaires lithographiques, dont les affleurements, jonchés de petits cailloux blancs, engendrent les plaines monotones de la Champagne berrichonne. Encore calcaire dans la Sarthe, le séquanien, dans le Calvados, devient en partie sableux, et on y observe à Glos une couche très riche en trigonies bien conservées. C'est la préparation du facies du nord, que nous avons déjà étudié.

Bassin du Rhône. Suisse. Allemagne. — Il est fort difficile, en Franche-Comté, d'indiquer où commence le rauracien, intimement fondu avec l'argovien. En revanche, les marnes et les plaquettes du séquanien supérieur, criblées d'*Astarte minima*, sont bien caractérisées, et quelques accidents coralligènes s'y montrent, comme ceux qui donnent les calcaires marmoréens à nérinées des environs de Dôle.

Le séquanien est entièrement calcaire et surtout compact dans la Côte-d'Or. Mais, dans le Bugey, sa partie supérieure redevient presque tout entière coralligène. C'est en ce point d'ailleurs que commence à se montrer la faune méridionale, bien caractérisée à Crussol dans les calcaires à *Perisphinctes polyplocus* et *Oppelia tenuilobata*, non moins développés dans le Gard, au mont Ventoux, en Provence, en un mot dans toute la région subalpine. L'ancien synclinal subsistait, excluant par son régime la formation des récifs.

Le séquanien a sa place dans la partie inférieure du *calcaire des hautes montagnes* de Suisse. Dépourvu de couches oolithiques en Argovie, il redevient partiellement coralligène en Souabe et en Franconie, grâce au voisinage des anciens massifs. On en retrouve des traces jusqu'en Poméranie.

Mais dans les Carpathes comme dans les Alpes orientales, les calcaires compacts dominent à ce niveau, n'offrant sou-

vent dans leur masse que des silex à radiolaires et des *Aptychus* (fig. 107). Il en est ainsi au Frioul.

Russie. Régions arctiques. Pays divers. — En revanche, dans le bras de mer qui unissait le centre de la Russie à la Petchora, le régime boréal des argiles noires, avec grosses bélemnites (*B. Panderi*) continuait à prévaloir. Cette mer atteignait la Terre François-Joseph, où un schiste bitumineux riche en *Aucella* a fourni le *Cardioceras alternans* du séquanien russe.

Des calcaires séquaniens existent en Syrie, en Inde dans le district de Catch, en Algérie, où ils sont rouges, en Abyssinie où leurs fossiles sont ceux de l'Europe, et à Madagascar.

Fig. 107. — *Aptychus*.

Dans la Cordillère argentine, la place de l'étage est le plus souvent occupée par des conglomérats à éléments porphyritiques, déposés dans un golfe fermé au sud, et que limitaient, à l'est le massif argentino-brésilien, à l'ouest une terre aujourd'hui effondrée dans le Pacifique.

Enfin des fossiles séquaniens, recueillis au Mexique, en Californie et dans l'Alaska, permettent de restituer au Pacifique septentrional de cette époque un contour peu différent du rivage actuel de l'Amérique du Nord.

§ 15

SÉRIE NÉOJURASSIQUE
4° ÉTAGE KIMERIDGIEN

Données générales sur le kimeridgien. — Dès le début de l'époque kimer.dgienne, la sédimentation devient franchement argileuse dans le nord de l'Europe, qui ne reverra plus ni constructions de polypiers, ni même, au moins pour longtemps, de dépôts calcaires. Le massif armoricain ne tardera pas à se souder au Plateau Central, et le détroit de la Côte-d'Or, par où s'établissait la communication du bassin de Paris avec la mer rhodanienne, se rétrécit peu à peu. Les calcaires ooli-

thiques n'apparaîtront plus désormais que dans le sud-est, et les influences septentrionales se feront sentir jusqu'en Normandie, où se prépare un nouveau progrès de la terre ferme.

Le Kimeridgien comporte deux divisions : à la base, le sous-étage *ptérocérien*, ou zone à *Pictonia Cymodoce*; au sommet, le sous-étage *virgulien*, ou zone à *Reineckeia pseudomutabilis*, avec grand développement de l'*Exogyra virgula*. Dans le midi, *Oppelia tenuilobata* continue à habiter la première zone, la seconde voyant surtout se multiplier les ammonites du genre *Neumayria*. L'apparition, dans le nord, des grands dinosauriens terrestres du genre *Iguanodon* date du kimeridgien.

Europe nord-occidentale. — Une partie seulement de l'*argile de Kimeridge*, en Angleterre, appartient à l'étage kimeridgien, celle où les gryphées virgules abondent, ainsi que les restes de grands sauriens, et où se montre encore *Belemnites nitidus*. A cette assise correspondent, à l'embouchure de la Seine, d'abord le calcaire marneux à ptérocères de la Hève, ensuite les argiles et lumachelles à *Exogyra virgula*, mélangées de calcaires dans le Pays de Bray. Au contraire, dans le Boulonnais, au voisinage du massif ancien qui limitait le rivage, le kimeridgien offre une succession variée d'assises gréseuses, d'argiles et de bancs calcaires avec lumachelles à gryphées virgules.

Ces lumachelles se retrouvent dans les Ardennes et aussi en Lorraine; mais là, elles ne forment plus que des intercalations au milieu de marnes et de calcaires lithographiques, ces derniers, en petits bancs, se prononçant surtout dans le Barrois, et reparaissant dans le Berry au sommet de l'étage, dont la base laisse voir quelques lits oolithiques à nérinées; dernier effort septentrional d'un facies qui se retire vers le sud.

Jura. France méridionale. — Marneux, quelquefois grumeleux, plus souvent compact, le calcaire kimeridgien de la Franche-Comté devient oolithique dans le Jura méridional et prend à Valfin un facies nettement coralligène, avec *Heterodiceras* et nérinées. Cette assise est ptérocérienne et surmontée par une oolithe virgulienne, qui se développe bien aux environs de Saint-Claude, mais fait place, à Cerin, Orbagnoux, etc., à des schistes calcaires, souvent bitumineux, avec restes de

poissons et profusion de végétaux terrestres, cycadées et fougères. Ainsi la terre ferme est proche et une émersion ne va pas tarder à se produire.

Dans le synclical dauphinois, notamment à Grenoble, la prépondérance du facies vaseux engendre les *calcaires de la Porte de France* (*intra-muros*), avec *Aptychus*, ainsi que les calcaires compacts, mais en bancs très réguliers, du château de Crussol et ceux du Ventoux.

On voit donc que, par opposition avec le bassin de Paris, où régnait l'influence septentrionale, tout l'étage est calcaire dans le midi. Il l'est également sur le revers sud-ouest du Plateau Central, et même, à la Rochelle, le ptérocérien revêt de nouveau un facies coralligène, faisant pendant à Valfin, dans le calcaire à polypiers et à oursins (*Acrocidaris nobilis*) de la Pointe du Ché. L'entourage de cette assise ne laisse pas de doute sur la persistance, à cette époque, de la communication entre le bassin de Paris et l'Aquitaine par le détroit de Poitiers.

Europe orientale. Pays divers. — Dans le Jura suisse, le ptérocérien se développe au point d'absorber, au moins comme facies, le virgulien, réduit à quelques mètres. Les deux étages se fondent dans la partie moyenne du *malm* calcaire de la Suisse centrale, et du *jura blanc* de la Souabe, mais se différencient de nouveau en Franconie, où non seulement des couches oolithiques, mais de vrais récifs (Nattheim) apparaissent avec des dolomies dans le virgulien. Même des oolithes à ptérocères et à gryphées virgules s'étendent, à la même hauteur, jusqu'au massif du Deister en Hanovre, donnant à penser qu'à cette époque la mer européenne se fermait du côté de la Pologne, limitant les communications boréales à la région de la mer du Nord.

Pendant ce temps, l'influence méditerranéenne, longeant la barrière alpine, se faisait sentir en Silésie, où elle donnait naissance au calcaire massif dit *felsenkalk*. Ailleurs, c'est toujours le type des calcaires à *Aptychus* qui prévaut, comme c'est le cas au Frioul et en Italie.

Une argile glauconieuse à *Reineckeia pseudomutabilis* a laissé quelques traces près de Moscou, où sans doute elle s'est déposée dans un golfe d'un bras de mer boréal.

Connu à Spiti (Himalaya) et à Catch (Hindoustan), le Kimeridgien est dolomitique en Algérie, tandis qu'en Abyssinie on trouve un ptérocérien presque identique avec celui d'Europe, et se reliant par Monbassa avec le Kimeridgien de Madagascar, à *Perisphinctes*. Comme d'ailleurs un golfe jurassique persistait sur l'emplacement de la Cordillère entre l'Argentine et le Chili, on voit que la géographie kimeridgienne différait peu de celle du séquanien. Seulement c'est tout au plus si la Californie était alors couverte par la mer.

§ 16

SÉRIE NÉOJURASSIQUE
5° ÉTAGE PORTLANDIEN

Données générales sur le portlandien. — L'époque portlandienne marque une date importante pour l'histoire géologique, non seulement de l'Europe, mais de l'hémisphère boréal. Au moment où elle se termine, la mer a presque entièrement quitté la région française, qui se couvre çà et là de formations d'eau douce ou d'estuaire, parfois de lagunes d'évaporation. Le régime marin se trouve relégué dans deux domaines bien différents, et sans communication directe l'un avec l'autre; à savoir dans la mer du Nord, où continuent d'agir les influences boréales, demeurées efficaces aussi dans le bassin de la Volga, et dans la Méditerranée, à ce moment franchement pélagique, où se forment les calcaires dits *tithoniques*.

Pendant ce temps, l'Amérique du Nord est constituée, à peu de chose près, dans son contour actuel; et, sur son territoire, les énormes dinosauriens se multiplient. Du même coup, de nouveaux éléments s'introduisent dans la flore terrestre, par des types qui possèdent déjà les caractères fondamentaux des dicotylédones angiospermes.

La partie inférieure du portlandien, celle où le régime marin s'affirme encore dans le bassin anglo-parisien, forme le sous-étage *bononien* (de *Bononia*, Boulogne-sur-Mer), débutant, en fait d'ammonites, par la zone à *Stephanoceras portlan-*

dicum, pour finir par celle à *Perisphinctes bononiensis*. C'est à cette hauteur que se placent, dans le midi, les calcaires à *Pygope diphya*. Ensuite vient le sous-étage *purbeckien*, correspondant à l'épisode d'émersion, et dont l'équivalent marin doit être cherché dans l'*aquilonien* des géologues russes, comme aussi dans la zone à *Hoplites Calisto* de la région méditerranéenne.

Angleterre méridionale. Boulonnais. Normandie. — Une partie du *Kimeridge-clay* doit revenir au bononien, qui comprend en outre l'assise sableuse dite *Portland sand* et les calcaires marins ou saumâtres du *Portland stone*, avec *Trigonia gibbosa*.

Ce même ensemble est de composition très variée aux environs de Boulogne-sur-Mer, où des épisodes d'estuaire s'introduisent à plusieurs reprises, accusant bien la tendance à l'émersion qui allait prévaloir. Tout à fait en haut apparaissent des couches contenant une faune d'eau douce semblable à celle du *Purbeck* anglais, assise célèbre par les mammifères et les souches de végétaux en place (*Cycadeoidea*) qu'on y a rencontrés. Quant à la formation de sables fins et d'argiles qui vient ensuite et à laquelle on a donné le nom de *wealdienne* (à cause du Weald), il est possible qu'une partie doive être considérée comme un équivalent de l'aquilonien.

La même conclusion s'appliquerait aux argiles, tombées dans une crevasse du terrain houiller du Hainaut, et qui ont fourni les restes des célèbres iguanodons du Musée de Bruxelles. L'émersion de ces contrées du nord a coïncidé avec la formation de quelques grands fleuves, qui débouchaient dans une zone comprise entre l'estuaire de la Tamise et le Hanovre, et où les mêmes conditions de dépôt se répètent, parfois avec couches intercalées de combustible fossile.

Le portlandien se revoit dans le pays de Bray. Là, comme dans le Boulonnais, la présence, dans ses sédiments, de galets empruntés à des roches primaires, et mieux encore l'existence, vers le sommet du bononien, de lits entiers de cailloux de même origine, trahissent le voisinage d'un district en voie d'émersion.

Barrois, Jura, Aquitaine. — Les circonstances sont diffé-

rentes dans l'est du bassin de Paris, où le bononien est représenté par les *calcaires du Barrois*, tantôt lithographiques, tantôt cariés et tubuleux et surmontés par l'*oolithe vacuolaire* ou pierre de Savonnières. Cet ensemble témoigne d'un régime marin beaucoup plus franc que celui du Boulonnais, grâce à une communication avec la Franche-Comté, où des calcaires

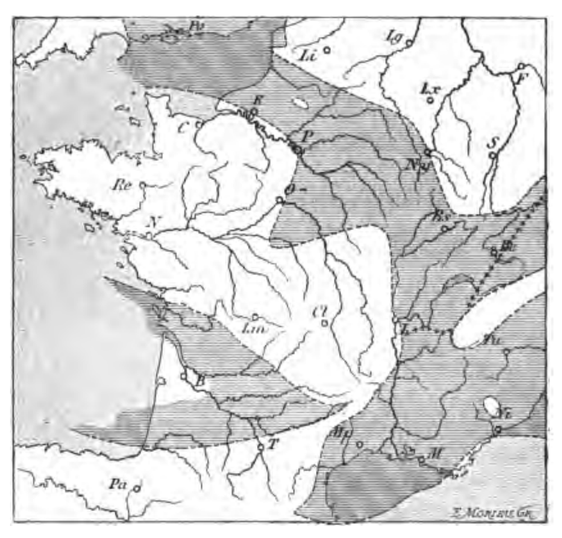


Fig. 108. — Esquisse de la France portlandienne. La ligne ++++ marque la limite méridionale du continent purbeckien.

lithographiques supportent une *dolomie portlandienne* avec fossiles d'eau saumâtre.

Ici la tendance à l'émersion s'accuse bien ; et en effet, dans le Jura, le portlandien supérieur ou purbeckien est représenté par des couches d'eau douce bien caractérisées.

Au même moment, le détroit poitevin commençait à se fermer (fig. 108) et le bassin jurassique de l'Aquitaine se transformait sur les Charentes en lagunes d'évaporation. Cette transformation, annoncée dès la fin du bononien par l'apparition de mollusques d'eau saumâtre (*Cyrena*) dans les couches

à trigonies, devient manifeste dans les argiles gypsifères et salifères des Pays-Bas charentais. De longtemps la mer ne reviendra plus sur cette région.

Bassin du Rhône. — L'émersion ne s'étendait pas à la région méditerranéenne. Au contraire, il s'y développait, à partir de la latitude de Genève, un facies pélagique spécial, le facies *tithonique*, par lequel s'établit une transition absolument continue du néojurassique au système crétacique.

Ce facies comprend à la fois des formations coralligènes, comme celles du Salève, d'Aizy, de l'Echaillon en Isère, et dans le grand synclinal subalpin, des assises vaseuses à céphalopodes et à térébratules trouées, notamment *Pygope janitor*, assises dont font partie les calcaires de la Porte de France à Grenoble (*extra-muros*). Les *Phylloceras* y sont fréquents et un nouveau genre d'ammonites, *Hoplites*, y fait son apparition.

Le recul méridional des calcaires construits par les polypiers est ici bien frappant. La plus haute latitude qu'atteigne ce facies est à peu près celle de Genève. En revanche il se développe au sud, le long des Cévennes, engendrant les calcaires *ruiniformes* du Gard, avec *dicératidés* qui présagent les formes crétaciques, et se retrouve aux environs de Marseille.

Régions alpines et méditerranéennes. — De l'autre côté des Alpes, en Suisse, on constate que la partie portlandienne du *calcaire des hautes montagnes* a dû occuper une grande surface. C'est à ce moment que la mer jurassique paraît avoir été le plus étendue sur ce pays, comme par compensation de ce qui se passait au nord-ouest; et les Alpes devaient alors former un archipel à bordures coralliennes.

Plus au nord, en Souabe, c'est une vase calcaire impalpable qui s'est déposée à la même époque, sans doute à la faveur d'une anse où régnait un grand calme. Ainsi se sont formés les célèbres calcaires en plaquettes de Solenhofen, avec empreintes de méduses et d'insectes. C'est là qu'ont été trouvés, avec les ammonites *Oppelia lithographica*, *O. steraspis*, encore munies de leurs *Aptychus*, les restes des petits vertébrés si curieux, *Archæopteryx* et *Rhamphorhynchus*.

Représenté surtout, dans les Alpes orientales, par des

calcaires à *Aptychus*, le portlandien prend, dans les Carpathes, tantôt cette même forme, tantôt celle de calcaires bréchoïdes, aujourd'hui isolés en petits massifs (*Klippenkalk*), avec une faune nettement tithonique. Dans les Alpes méridionales, la couleur rouge reparaît, engendrant l'*ammonitico rosso superiore*, à *Pygope janitor*, tandis que, plus au sud, les calcaires, dont les *Phylloceras* et *Lytoceras* affirment le caractère méditerranéen, renferment plutôt *Pygope diphya*, déjà connue de ce niveau dans les Alpes bavaroises.

Le même type se retrouve en Andalousie, en Sicile et en Crimée. Ainsi la province méditerranéenne du jurassique est mieux caractérisée et plus homogène que jamais, au moment où le bassin anglo-parisien va être momentanément abandonné par la mer.

Régions septentrionales. Pays étrangers divers. — Pendant que régnait dans la Méditerranée le régime des calcaires à *Aptychus* et à térébratules perforées, les eaux marines continuaient à occuper, d'une part le bassin de la mer du Nord, d'autre part la Russie orientale depuis la mer Glaciale jusqu'à la Caspienne. Dans ce dernier district se sont déposés les argiles foncées et les grès glauconieux du *volgien*, avec bélemnites spéciales (*B. lateralis*, *B. russiensis*), nombreux mollusques du genre *Aucella*, et ammonites des genres *Virgatites*, *Craspedites*, etc. La partie supérieure de cet ensemble est l'*aquilonien* ou facies marin du purbeckien.

Ce même facies se retrouve en Angleterre, à Speeton dans le Yorkshire, tandis que, sur le Hanovre, le portlandien n'a rien de boréal; ce qui donne à penser que la mer russe se reliait à celle de Speeton en faisant le tour de la Scandinavie. De là, poussant au sud, elle faisait sentir son influence jusqu'au Boulonnais, où des *Virgatites* et des bélemnites de type russe ont été trouvés dans le portlandien supérieur des falaises de Boulogne.

La mer à *Aucella* du volgien a sensiblement empiété sur la Sibérie, arrivant jusqu'à Jakoutsk. D'un côté, elle a baigné la Terre François-Joseph, de l'autre elle s'est étendue sur l'Alaska et la Colombie anglaise, mais sans atteindre la région des Montagnes Rocheuses, où se déposaient, dans des lacs

d'eau douce, les couches à ossements de grands dinosauriens, *Atlantosaurus*, *Brontosaurus*, avec des restes végétaux (*Cycadeoidea*) et des mammifères comme ceux de Purbeck. C'est à la même époque qu'un océan ou au moins un golfe atlantique venait baigner la côte orientale de l'Amérique et recevait des dépôts d'estuaire comme celui du *Potomac*, où apparaissent les plantes dicotylédones angiospermes. Mais il est possible que ces depôts appartiennent au crétacique.

En revanche, l'influence boréale, léchant la côte californienne, arrivait jusqu'au Mexique.

Enfin le tithonique ou portlandien, de type européen méridional, est bien caractérisé entre le Chili et l'Argentine, où ses sédiments sont en association intime avec des conglomérats porphyritiques, attestant la permanence des éruptions en ce point.

D'ailleurs la faune portlandienne n'est pas moins nettement développée dans l'Afrique orientale et à Madagascar, où certaines formes d'ammonites sont très voisines de celles du Boulonnais.

CHAPITRE VI

SYSTÈME CRÉTACIQUE

§ 1

GÉNÉRALITÉS SUR LA PÉRIODE CRÉTACIQUE
SÉRIE ÉOCRÉTACIQUE

Traits généraux de la période crétacique. — L'émersion qui avait marqué la fin des temps portlandiens n'était, pour l'Europe occidentale, qu'un premier essai vers la conquête de son relief. A peine cette émersion était-elle accomplie que la mer, revenant par le sud-est, se préparait à envahir de nouveau cette

partie de la terre ferme, pour arriver, par une série d'étapes, à reconquérir un espace au moins aussi grand que celui qu'elle avait occupé lors du callovien.

Les premières phases de cette invasion, chacune en progrès sur la précédente, ont laissé presque partout des sédiments détritiques, le régime calcaire demeurant cantonné dans les pays méditerranéens. Ces sédiments, qui commencent par des sables, pour finir par un épisode assez généralement argileux, forment par leur ensemble la *série éocrétacique* (ancien *infracrétacé*).

Durant ces premières phases, la terre ferme, très réduite en étendue dans l'ouest de l'Europe, perdait progressivement son relief. Aussi, pendant le dépôt de la série supérieure ou *néocrétacique*, les mers de l'archipel européen, ne recevant en général que très peu d'apports terrigènes, se sont-elles peu à peu clarifiées, et leur fond s'est garni de dépôts organiques, dont le plus caractéristique et le plus récent est la *craie* blanche (d'où le nom du système). Enfin, à la suite de ce comblement, un plissement s'est produit, et la mer a été rejetée hors du territoire, perdant encore plus de terrain qu'elle n'en avait abandonné à la fin des temps jurassiques.

La place où devaient un jour surgir les Alpes continuait à être indiquée, sur le côté externe (c'est-à-dire convexe) de la future chaîne, par un synclinal, marquant une zone faible de l'écorce, où s'accumulaient des dépôts détritiques. Mais tandis qu'à l'époque jurassique la sédimentation vaseuse avait dominé dans cette dépression, pendant les temps crétaciques ce mode de dépôt ne s'est maintenu qu'au début et seulement dans les Alpes occidentales. Plus à l'est, le synclinal s'est rempli d'un mélange de marnes et de dépôts arénacés, engendrant un type spécial de terrains, qui devait atteindre le maximum de son développement à l'époque tertiaire, sous l'aspect de ce que les géologues suisses ont appelé le *flysch*. Le *grès carpathique* est la forme crétacique de ce mode de sédimentation, qui semble indiquer que le bourrelet alpin se préparait de plus en plus à apparaître à la surface, fournissant, par sa destruction graduelle, des débris de moins en moins fins.

Une histoire analogue s'est déroulée en Amérique. Là aussi une invasion par étapes a fini par atteindre un maximum d'extension qui n'avait pas encore été réalisé depuis le permien, et qui s'est aussi terminé par un asséchement encore plus définitif que celui de l'Europe.

Généralités sur la série éocrétacique. — La série éocrétacique est celle qui, en Europe comme en Amérique, a préparé l'avènement du régime crayeux. C'est encore le règne des reptiles, surtout des dinosauriens, et ce qu'on connaît des mammifères ne marque aucun progrès.

Les ammonites subissent une véritable révolution. *Perisphinctes* et *Holcostephanus* s'éteignent bientôt, cédant la place à *Hoplites* (fig. 109), *Acanthoceras* (fig. 110), *Pulchellia*, *Desmoceras*, etc.



Fig. 109. — *Ammonites* (*Hoplites*) *interruptus*.

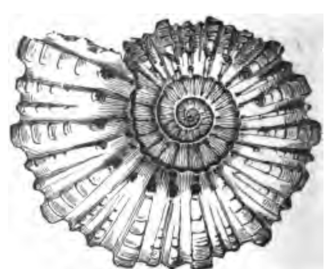


Fig. 110. — *Ammonites* (*Acanthoceras*) *mamillaris*.

En même temps se produit une remarquable expansion des ammonitidés à tours disjoints ou en hélice, *Ancyloceras* (fig. 111), *Crioceras*, *Hamites* (fig. 112), *Macroscaphites*.

Les bélemnites, surtout dans les régions méditerranéennes, tendent à s'aplatir et à devenir irrégulières, comme dans *Duvalia* (fig. 113).

Les *Diceras* ont terminé leur carrière, mais sont remplacés par *Requienia* (fig. 114), *Monopleura*, *Toucasia*, ainsi que par les précurseurs des caprotines du néocrétacique. Ces chamidés, précédant les vrais *rudistes*, vont devenir la caractéristique des dépôts coralligènes de l'époque.



Fig. 111. — *Ancycloras* (*Crioceras*) *Matheroni.*

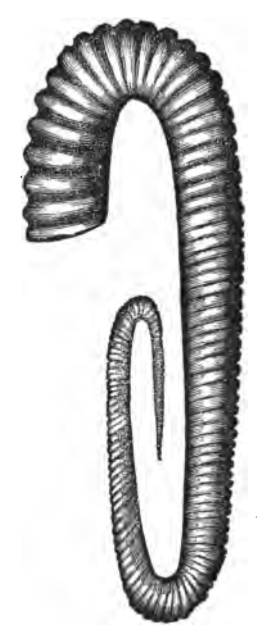


Fig. 112. — *Hamites attenuatus.*



Fig. 113. — *Belemnites Emerici.*

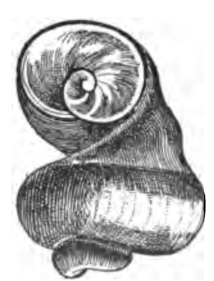


Fig. 114. — *Requienia* (*Chama, Caprotina*) *ammonia.*



Fig. 115. — *Toxaster complatanus* (*Spatangus retusus*).

Près des côtes abondent des oursins spatangoïdes, tels que *Toxaster* (fig. 115).

La flore éocrétacée, où dominent les cycadées et les conifères, est encore une flore jurassique, excepté en Amérique, où se montrent les angiospermes. Les mêmes associations de types tropicaux avec des sapins et des cèdres se retrouvent à la fois dans l'Europe centrale et, près du pôle, au Groenland. Cependant les peupliers apparaissent dans cette dernière contrée, comme indice d'une différenciation des climats, déjà prononcée dans la zone arctique.

La série éocrétacique peut se diviser en quatre étages, qui sont, de bas en haut : le *néocomien* (de Neuchatel en Suisse) ; le *barrémien* (de Barrême aux Basses-Alpes) ; l'*aptien* (d'Apt en Vaucluse) ; enfin l'*albien* (du département de l'Aube). Le barrémien correspond à l'ancien étage *urgonien* de d'Orbigny.

§ 2

SÉRIE ÉOCRÉTACIQUE

1° ÉTAGE NÉOCOMIEN

Données générales sur le néocomien. — Tandis que, dans la partie orientale du bassin de Paris, le néocomien repose en transgression manifeste sur le jurassique, dans le bassin méditerranéen comme dans les régions boréales, il succède au portlandien sans aucune discontinuité. La transition s'établit par une zone de passage, le *berriasien* (de Berrias en Ardèche), à *Hoplites Boissieri* et *Pygope diphyoides*. Le néocomien proprement dit comporte deux sous-étages : le premier ou *valanginien* (de Valangin près Neuchatel) est encore susceptible d'accidents coralligènes, sous forme de couches avec dicérates du genre *Valletia*, qui établissent le passage des dicératidés jurassiques à ceux du crétacique. Son ammonite caractéristique est *Hoplites neocomiensis*, accompagné de quelques *Oxynoticeras*. Le sous-étage supérieur ou *Hauterivien* (d'Hauterive), plutôt marneux, est l'horizon d'*Hoplites radiatus* et celui où commencent les ammonitidés à tours déroulés (*Crioceras Duvali*).

Jura, France, Angleterre méridionale. — Dans la région typique du néocomien, autour de Neuchatel en Suisse, il y a contraste marqué entre les masses blanches calcaires du valanginien, bien développées aussi au Salève, et les marnes, entremêlées de calcaire jaune, de l'hauterivien, annonçant la fin, dans ces régions, des formations engendrées par l'activité corallienne. C'est dans l'hauterivien que commencent à se montrer les grains de *glauconie* ou silicate hydraté de fer et de potasse, qui inaugurent le régime des *grès verts*.

La mer néocomienne, arrivant du Jura et contournant le Morvan, s'est étendue jusqu'au Sancerrois, respectant toute la France occidentale. Cette invasion, qui a été progressive, s'est produite dans l'Yonne à la fin du valanginien, dont la place est occupée dans la Haute-Marne par une argile à ossements de tortues, qui accuse une émersion d'une certaine durée, et que recouvrent des sables à minerai de fer. L'hauterivien de ces contrées est un calcaire jaune en petits bancs marneux, le *calcaire à spatangues*, ainsi nommé d'un oursin (*Spatangus retusus* ou *Toxaster complanatus*), qu'accompagne *Ostrea Couloni*; ces deux fossiles étant communs dans l'hauterivien de Neuchatel.

Le calcaire à spatangues n'atteint pas les Ardennes et quand, dans le Pays de Bray, on revoit des formations supérieures au jurassique, c'est un tout autre facies qui s'introduit : celui des sables, avec argiles réfractaires (Forges-les-Eaux), dont le type le plus complet existe dans le wealdien anglais. Ce sont des dépôts d'estuaires, et s'il est difficile d'y indiquer avec certitude où finit le jurassique, la part du néocomien y est affirmée, dans le Bray, par quelques incursions marines, comme celle que trahit un grès ferrugineux à *Astarte numismalis*, fossile du calcaire à spatangues de la Haute-Marne.

En Angleterre, les sables et argiles bariolés du *wealdien* atteignent 600 mètres de puissance et renferment des dinosauriens, des coquilles d'eau douce, quelques-unes d'eau saumâtre, des cycadées et des conifères.

Province boréale. — Il en est tout autrement dans le Yorkshire, où la falaise de Speeton montre la superposition à l'aquilonien d'une argile à *Belemnites regalis*, avec les ammo-

nites *Polyptychites* et *Hoplites*, supportant une autre argile à *Belemnites jaculum* avec *Hoplites noricus* et ammonites de l'hauterivien. C'est le facies boréal franc, qui s'étend sur le Hanovre, bien caractérisé dans l'*argile du Hils*, mais en laissant au sud se poursuivre contre le rivage une bande wealdienne, accusée dans les grès du Deister, avec lits charbonneux.

La mer boréale formait-elle un golfe au Hanovre, ou bien se reliait-elle, par un bras dont aucun vestige n'aurait subsisté, avec la Russie orientale? Toujours est-il que, de Moscou à la Petchora il y avait, le long de l'Oural et de la Volga, au moins un golfe profond, ouvert au nord. Il s'y est déposé les argiles sableuses et glauconieuses, à nodules phosphatés, du *petchorien*, où se rencontrent les ammonites et les bélemnites de Speeton, ainsi que des aucelles (*Aucella volgensis*). Ce type boréal, également signalé sur la Terre du Roi-Charles, près du Spitzberg, se retrouve au nord de la Sibérie, dans l'Alaska, dans la Californie (*couches de Knoxville*) et jusqu'au Mexique; ce qui semble bien indiquer que le développement de la formation à aucelles était dû, moins à la température des mers qu'à un certain ensemble de conditions géographiques.

Zone alpine. Région méditerranéenne. — Le synclinal subalpin continuait, à l'époque néocomienne, à se remplir de dépôts vaseux, qui ont engendré les couches à ciment et à *Pygope diphyoides* des environs de Grenoble, supportant des marnes à ammonites pyriteuses et des calcaires marneux à criocères et bélemnites plates. Ce facies s'étendait sur le Languedoc oriental; mais tout le bassin de la Garonne et de ses affluents était alors émergé.

Dans la direction opposée, en Suisse, la mer néocomienne amenait les mêmes fossiles et les mêmes sédiments qu'au Jura. Mais, à partir des Alpes bavaroises, s'introduisait le *facies carpathique*, marneux et schisteux, avec bélemnites plates et *Aptychus*.

La région méditerranéenne a vu prédominer un type spécial et très uniforme de sédimentation, représenté par un calcaire compact blanc-grisâtre, le *biancone* des Alpes vénitiennes. Ce facies embrasse plus d'un étage; mais les fossiles,

Aptychus, *Holcostephanus*, *Hoplites*, montrent la place que le néocomien y peut réclamer. Un calcaire semblable, massif, souvent à silex, se montre dans l'Apennin, mais subordonné à des couches schisteuses. La même chose a lieu en Sicile, où le genre méditerranéen *Phylloceras* accompagne toujours les *Aptychus* et les *Duvalia*.

En Andalousie, c'est le facies vaseux à céphalopodes qui prévaut, dans le détroit largement ouvert qui mettait alors la Méditerranée en communication avec l'Atlantique. Mais au Portugal, le voisinage du littoral se fait sentir par des intercalations de grès à végétaux terrestres. Au contraire, c'est le type alpin vaseux qui règne dans le Tell algérien.

Afrique, Asie, Amérique. — Le néocomien existe dans l'Afrique orientale, au Cap, à Madagascar, à Catch en Inde. Dans toute cette zone, il est assez riche en bélemnites et en ammonites; mais c'est l'abondance des trigonies qui imprime à cette province tropico-australe son caractère particulier.

Enfin le néocomien a probablement sa représentation, sur le bord atlantique des États-Unis, dans les couches à végétaux du *Potomac*, où abondent les conifères et les cycadées, avec les premières angiospermes. Une flore semblable se revoit dans les Montagnes Rocheuses au-dessus des couches à grands dinosauriens. La mer passait donc au sud des États-Unis; mais on retrouve ses traces, sous forme de couches à criocères, en Nouvelle-Grenade comme au Chili. Elle contournait le massif brésilien et atteignait la Cordillère argentine, où la présence des trigonies du Cap fait soupçonner une liaison par le sud avec la région africaine.

§ 3

SÉRIE ÉOCRÉTACIQUE
2° ÉTAGE BARRÉMIEN

Généralités sur le barrémien. — Au-dessus du néocomien du bassin du Rhône se développe en Provence un ensemble d'assises où les accidents coralligènes, avec chamidés du genre *Requienia*, deviennent fréquents, ayant leur type à Orgon

(Vaucluse). D'Orbigny en avait fait son étage *urgonien*; mais il s'est produit à ce propos la même chose qu'avec le corallien du néojurassique; c'est-à-dire que l'urgonien s'est révélé comme un facies, capable d'embrasser des horizons différents. et peu propre de sa nature à indiquer un âge déterminé. La considération des ammonites, à laquelle il convient de rester fidèle, conduit à prendre dans les Basses-Alpes, à Barrême, le type du nouvel étage, qui devient ainsi le *barrémien*. caractérisé : à sa base par *Crioceras Emerici* et *Pulchellia compressissima*; au milieu par *Desmoceras difficile*, *Costidiscus recticostatus*, *Macroscaphites Yvani*; au sommet par un niveau à *Heteroceras*.

Provence, Dauphiné. — Lorsque, de Barrême et de la Montagne de Lure, où prévaut le type à céphalopodes dont la composition vient d'être indiquée, on s'éloigne, soit vers Orgon, soit dans la direction de la Grande-Chartreuse, on voit le facies coralligène envahir divers horizons du barrémien, mais surtout la partie moyenne, engendrant le calcaire blanc crayeux à *Requienia ammonia* et *Agria* (ancien *calcaire à caprotines* des auteurs). A Orgon, comme dans le Vercors, ce premier calcaire *urgonien* est surmonté, à la hauteur du barrémien supérieur, par un autre calcaire semblable, à petites *Toucasia carinata*, sans préjudice d'une nouvelle assise qui appartient à l'étage suivant et qui peut-être renferme les gisements les plus fossilifères d'Orgon.

Mais, dans le Vivarais, ces accidents s'effacent, laissant reparaître le type vaseux, sous la forme des calcaires à chaux hydraulique de Cruas; et, en plus d'un point, l'assise à *Toucasia* se transforme en une marne, riche en petits foraminifères du genre *Orbitolina* et en oursins (*Heteraster oblongus*).

Région alpine et méditerranéenne. — En s'éloignant vers le nord, on voit, dans le Chablais et la Suisse, les *calcaires à requiénies* jouer un rôle important. Ce sont des masses blanches compactes (*Schrattenkalk* de la Suisse allemande), sur lesquelles se dessinent bien les sections de *Requienia*, mais qui, comme à Orgon, doivent se partager stratigraphiquement entre le barrémien et l'étage suivant. A plus d'une reprise, elles sont associées à des couches avec criocères. A coup sûr

ces bandes calcaires se sont formées, grâce à l'activité zoogène, en bordure des îlots qui constituaient alors l'archipel alpin. Il en est encore ainsi dans les Alpes bavaroises, à partir desquelles le *facies carpathique* apparaît à cette hauteur. Mais, à Wernsdorf, où l'on touche un rivage septentrional de la mer, attesté par des schistes bitumineux à végétaux

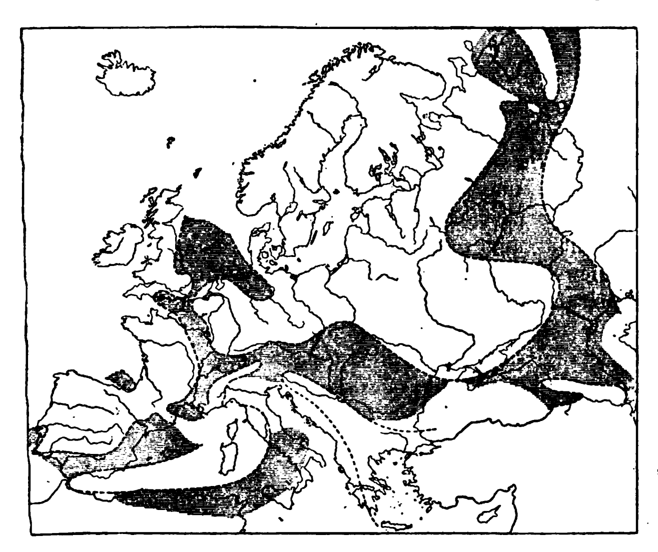


Fig. 116. — L'Europe à l'époque barrémienne.

terrestres, on retrouve tous les céphalopodes du barrémien provençal, parvenus là au terme le plus septentrional qu'ils aient atteint vers l'est (fig. 116).

Au contraire, au sud, par exemple en Lombardie, c'est le facies du *biancone* qui se reproduit; et il est bien probable que le barrémien a sa place dans une bonne partie des calcaires à nérinées et à chamidés qu'on observe à plus d'une reprise entre Rome, la Calabre et même la Sicile. Toute cette région devait former un archipel, où les îles servaient d'appui à des constructions de calcaires zoogènes.

Des circonstances analogues se produisaient dans les Pyré-
nées, où les calcaires à *Toucasia* (*urgo-aptien* des auteurs)
paraissent à cheval sur le barrémien et sur l'étage suivant.
Mais, dans le sud de l'Espagne comme en Algérie, reparaît le
facies vaseux à céphalopodes, avec grand développement des
Phylloceras, comme *P. infundibulum*, et des *Pulchellia*.

Europe septentrionale. — La mer du barrémien, comme
celle du néocomien, a réussi à s'avancer par la Haute-Marne et
l'Aube jusqu'au Berry, mais avec de fréquents retours du
régime continental. Aussi voit-on des couches marines, comme
l'*argile ostréenne* à *Ostrea Leymeriei* et la *couche rouge* de
Wassy, à *Heteraster oblongus*, s'enchevêtrer avec des sables
versicolores, une *argile rose marbrée* et un *minerai de fer ooli-
thique* à fossiles d'eau douce.

Les incursions marines, qui ne dépassaient pas à l'ouest le
méridien de Bourges, et n'ont jamais atteint le bord du massif
armoricain, ont été de moins en moins franches dans la direc-
tion du nord-ouest; aussi ne voit-on, dans le Bray, que des
grès ferrugineux avec argiles à poteries. Mais en Angleterre,
au-dessus des couches wealdiennes, le *grès vert inférieur*
ramène par endroits des lits à coquilles marines, notamment
Ostrea Leymeriei, qui montrent qu'en ce point on se rappro-
chait de la mer.

En effet, à Speeton, des argiles à ammonites boréales (*Sim-
birskites*) et bélemnites (*Bel. jaculum*), suite naturelle de
celles du néocomien septentrional, contiennent des criocères.
La même série s'étend sur Helgoland ainsi que sur le Hanovre,
où certains gisements d'argile abondent en *Crioceras* et *Ancy-
loceras*.

Ici, comme pour le néocomien, on peut se demander si la
mer du Hanovre était fermée à l'est, comme l'indique la
figure 116, ou si elle communiquait avec le bras qu'envoyait
tout le long de l'Oural la mer boréale à *Simbirskites* et bélem-
nites, dont on suit les traces jusqu'à Moscou.

Amérique, Afrique, Régions arctiques. — On sait peu
de choses sur le barrémien asiatique, et s'il est probable que
l'étage est représenté au Texas et au Mexique, on n'en a pas
encore l'absolue certitude. En revanche, la Nouvelle-Grenade

montre un tel développement des couches à *Pulchellia*, qu'on doit vraisemblablement y chercher le principal centre de dispersion de cette famille d'ammonites, qu'un rivage continu ou une chaîne d'îles atlantiques aurait amenée de là jusque dans la Méditerranée.

D'autre part, la mer continuait à empiéter légèrement sur l'Afrique orientale. Quant aux régions arctiques, le barrémien marin n'y est pas connu ; mais une flore terrestre semblable à celle de Wernsdorf a laissé ses débris au Groenland comme au Spitzberg. Seulement, aux espèces typiques des Carpathes sont ici associés des sapins et des peupliers, comme si le climat des régions polaires avait déjà commencé à différer un peu de celui des latitudes moyennes.

§ 4

SÉRIE ÉOCRÉTACIQUE
3° ÉTAGE APTIEN

Données générales sur l'aptien. — Avec l'aptien se dessine, dans l'Europe occidentale, un certain progrès de la mer, accusé à la fois dans les Pyrénées, alors complètement envahies, et dans le nord de la France, où le régime marin du grès vert, léchant le massif des Ardennes, s'étend par le Boulonnais jusqu'au sud-est de l'Angleterre.

Dans le sud comme autour des Alpes, des calcaires à requiénies continuent à accuser une certaine activité coralligène. Au contraire, sur le territoire de la mer du Nord, c'est l'influence boréale qui prévaut toujours, exprimée cette fois par des argiles à *Belemnites brunsvicensis*.

La zone inférieure de l'aptien, bien caractérisée à la Bedoule en Provence (d'où le nom de *bedoulien*), est l'horizon des grands *Ancyloceras* (*A. Matheroni*). C'est à Gargas, près d'Apt, que se montre la zone supérieure (*gargasien*), à *Hoplites Dufrenoyi*, *Ostrea aquila*, *Plicatula placunea*, avec des bélemnites (*Bel. semicanaliculatus*) très différentes de celles du nord.

Europe septentrionale. — Par la Côte-d'Or, la mer aptienne a atteint la partie nord-orientale du bassin de Paris

où, excluant cette fois les épisodes d'eau douce ou saumâtre, elle a déposé les *argiles à plicatules* et à *Ostrea aquila* de Saint-Dizier, transformées en grès vert dans les Ardennes, en sables et grès ferrugineux dans le Berry.

Le dernier effort occidental de la mer aptienne paraît indiqué par le poudingue ferrugineux du Cap de la Hève, à *Ostrea aquila* et *Acanthoceras Milletianum*. Mais, dans le sud-est de l'Angleterre comme au Boulonnais, c'est le type franc du *grès vert inférieur* qui se montre, et les fossiles habituels du Bassin de Paris commencent à s'y mélanger avec quelques bélemnites de type plus boréal.

Aussi doit-on penser qu'il y avait communication entre le golfe du *lower green sand* et la mer septentrionale qui, à Speeton, à Helgoland et au Hanovre, déposait les argiles à *Belemnites brunsvicensis* et *Ancyloceras gigas*.

Les *Ancyloceras* se retrouvent entre Moscou et Simbirsk; mais il semble que l'aptien russe ait été plutôt déposé dans un golfe ouvert au sud : car au Caucase le caractère de l'étage est essentiellement méditerranéen et provençal.

Régions méditerranéennes. — La Provence appartient toujours au type vaseux à céphalopodes, avec calcaires marneux à la base, et marnes noires à bélemnites au sommet. Mais, à Orgon, le facies coralligène se montre, dans la partie supérieure du calcaire dit urgonien, où *Toucasia carinata* est associée à de grands individus de *Requienia ammonia*, mais surtout aux premiers représentants de la famille des *Caprina*. Le même fait se reproduit dans le Vercors. Au Rimet, une marne à orbitolines s'intercale au milieu de l'aptien.

Marneux au Teil, où il donne les calcaires à chaux hydraulique de cette localité, l'aptien passe, à la Perte du Rhône, à l'état de *grès vert*, accusant une émersion de la plus grande partie du Jura. Il est plus pélagique en Suisse, où nous avons dit qu'une partie du *Schrattenkalk* devait lui appartenir. Enfin, à l'est, il revêt le facies du *grès carpathique*, sans exclure, jusqu'en Bucovine, le retour accidentel de calcaires à requiénies, toujours collés aux anciens massifs de la région.

Le *biancone* lombard renferme aussi une partie aptienne;

et ce peut être également le cas pour beaucoup des calcaires à requiénies de l'Apennin, de la Sicile et des Balkans, tandis qu'en Algérie, le type coralligène alterne avec des marnes à céphalopodes méditerranéens.

Amérique, Afrique. — La mer, continuant à envahir par le sud le territoire des États-Unis, a déposé, à l'époque aptienne, au Texas, les couches dites de *Trinity*, avec orbitolines, et peut-être celles de *Fredericksburg*. Plus au sud, dans la région mexicaine, il se construisait à cette époque des masses importantes de calcaires avec *Caprina* et *Requienia*. Il y avait donc alors une Méditerranée américaine, jouant le même rôle que la Méditerranée européenne, et au delà de laquelle les *Ostrea aquila* et *Acanthoceras Martini* dessinent en Colombie l'ancien rivage, si longtemps stable, du massif brésilien.

Ajoutons que l'aptien marin est connu sur la baie de Delagoa, dans l'Afrique orientale, comme à Madagascar, et que ses traces ont été signalées au détroit de Magellan.

§ 5

SÉRIE ÉOCRÉTACIQUE
4° ÉTAGE ALBIEN

Données générales sur l'albien. — A l'époque albienne, la mer accentue en Europe le mouvement d'invasion qui, timidement esquissé aux époques précédentes, deviendra la caractéristique des temps néocrétaciques. Si le plateau central de la France demeure encore largement soudé au massif armoricain (fig. 117), du moins la mer s'avance visiblement vers l'ouest; et, de plus, le régime essentiellement littoral des grès verts ne tarde pas à faire place, dans presque tout le bassin anglo-parisien, à une sédimentation argileuse. C'est l'*argile téguline* de l'Aube (d'où le nom d'*albien*), ou encore cette argile bleue, connue en Angleterre sous le nom de *gault*, désignation bien souvent employée comme synonyme d'albien. La faune devient aussi plus uniforme et les ammonites reparaissent en grand nombre dans des régions qu'elles

ne fréquentaient pour ainsi dire plus depuis la fin des temps jurassiques.

On peut distinguer dans l'étage une zone inférieure à *Acanthoceras Lyelli* et *A. mamillare*; une zone moyenne à *Desmoceras Beudanti* et *Hoplites interruptus*; enfin une zone supérieure à *Schloenbachia inflata* (*rostrata*). Ce dernier horizon est souvent présenté, sous le nom de *vraconnien* (de la Vraconne), comme une zone de passage entre l'albien et le néocrétacique, auquel plusieurs auteurs l'attribuent.

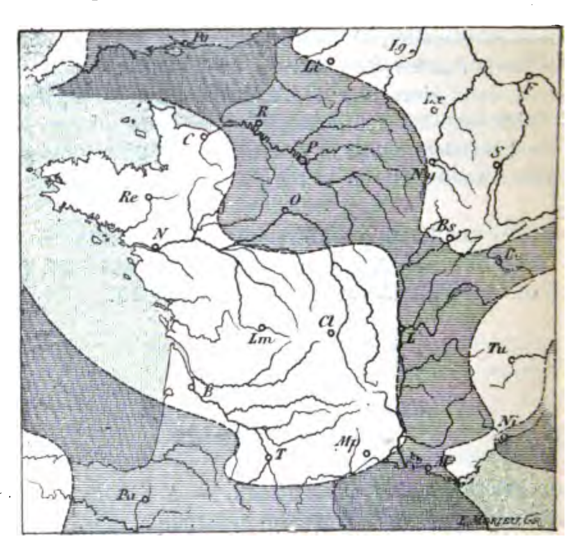


Fig. 117. — La France à l'époque albienne.

Bassin parisien. — La Champagne est la terre classique de l'albien français, qui débute par une assise de *sables verts* d'une réelle importance économique; car c'est dans ces sables que se concentre la nappe d'eau souterraine qui alimente les puits artésiens de Paris. L'argile téguline, bien développée et fossilifère à Montierender et à Brienne, fournit à sa base. dans les Ardennes, un horizon de nodules phosphatés pré-

cieux pour l'agriculture. Ces nodules trahissent un rivage, sur lequel les ammonites brisées et autres débris fossiles, remués par le flot en compagnie de matières organiques en décomposition, ont servi à fixer le phosphate. Dans l'Argonne, l'assise à *Schloenbachia inflata* reçoit une remarquable extension sous la forme de la *gaize*, roche de grès argileux, imprégné de silice hydratée, et qui, grâce à sa résistance, dessine à l'extérieur du bassin parisien le rempart des *Crêtes de l'Argonne*.

Sur l'autre bord du bassin, de la Bourgogne au Berry, la sédimentation albienne a été beaucoup plus troublée. Des sables verts de Saint-Florentin, on passe aux graviers ferrugineux de la Puisaye, entremêlés d'ocres, et qui se retrouvent dans le Sancerrois. Enfin, sur la bordure occidentale du bassin, dans l'Orne, l'étage n'est représenté que par une argile glauconieuse à *Ostrea vesiculosa*, équivalente à la gaize, et témoignant, par son application directe sur les terrains plus anciens, du progrès continu de la mer vers l'ouest.

Hainaut, Europe septentrionale. — Dans le Hainaut, la gaize devient plus siliceuse encore que dans les Ardennes et forme la *meule* de Bracquegnies, qu'on retrouve en Angleterre dans les *couches de Blackdown*, tandis que le gault argileux de Folkestone, riche en ammonites et en *Belemnites minimus*, repose sur une assise à *Acanthoceras mamillare* qui, par sa composition, fait encore partie du *grès vert inférieur*. Les nodules phosphatés du Boulonnais lui sont subordonnés.

Si nous cherchons à suivre en Angleterre le prolongement septentrional des dépôts albiens, nous constaterons que l'extension vers le sud du régime marin a eu pour effet de supprimer à Speeton la différence si tranchée qui jusqu'alors avait séparé la province boréale du bassin anglo-parisien. On remarque seulement que les bélemnites (*B. minimus*) sont plus fréquentes dans cette zone du nord, qui embrasse Helgoland, le Hanovre et la Poméranie, et où le gault revêt souvent le facies de *marnes flambées* (*Flammenmergel*), pour devenir tout à fait littoral à Greifswald.

Europe centrale, région méditerranéenne. — Le facies

sableux du gault, à la Perte du Rhône, où il est riche en fossiles et en nodules phosphatés, montre que le Jura septentrional alors émergé devait être longé au sud par la mer albienne. L'étage est plus calcaire dans la Suisse centrale, mais il redevient arénacé dans les Carpathes, où il forme le *grès du Godula*. Plus d'une fois, en Transylvanie, il apparaît sous la forme de conglomérats à éléments très variés, accusant l'invasion du bord d'un massif insulaire. Il n'est guère douteux qu'un bras étroit ait réuni la mer albienne d'Europe avec celle qui, s'étendant aux environs de Moscou et de Simbirsk, contournait une grande île de la Hongrie à l'Oural pour immerger, sous des grès verts et des marnes, le pourtour du Caucase, dont l'axe était déjà hors des eaux.

Un changement remarquable s'est produit avec l'albien dans les régions subalpines où, jusqu'alors, la sédimentation vaseuse avait régné sans partage. La fréquence, dans la Drôme et le Gard, des sables et graviers à nodules phosphatés, accuse la formation de hauts fonds, sinon d'îlots, entre la Provence et les Cévennes. Mais à partir des Corbières, on voit se reproduire, dans la région pyrénéenne et en divers points de l'Espagne, le type zoogène déjà connu des calcaires à *Toucasia*, contenant cette fois toute une faune de chamacés et de rudistes qui déjà présage le néocrétacique.

Seulement, à partir du milieu de l'Espagne, ce type alterne avec un autre, arénacé, et caractérisé par des huîtres qu'on retrouve en Algérie. Là, comme en Portugal, la zone supérieure de l'albien est très développée, étant caractérisée par l'ammonite *Placenticeras Uhligi* et par les oursins du genre *Enallaster*. Mais en Italie, comme en Sicile, se poursuivait le facies calcaire à *Toucasia* et *Caprina*.

Afrique, Asie, Amérique. — L'albien supérieur à *Enallaster* existe en Tunisie et au Liban. D'autre part on le retrouve en Colombie, au Pérou, où il contient encore *Placenticeras Uhligi*, et même en Bolivie. Il y a donc une remarquable continuité de cette faune depuis l'Amérique jusqu'à l'Asie. D'ailleurs, à ce moment, le morcellement de l'ancienne terre australe devait avoir fait des progrès; car l'albien supérieur est signalé au Gabon et, en face, on le retrouve non

loin de Pernambuco sur la côte du Brésil. Enfin sa présence n'est pas douteuse dans le Texas, où se montre le contact du facies à céphalopodes et à huîtres avec le type à rudistes, dont la vraie place doit se trouver dans les épaisses masses calcaires des Sierras mexicaines.

§ 6

SÉRIE NÉOCRÉTACIQUE
GÉNÉRALITÉS

Traits généraux de la période néocrétacique. — L'ouverture de la période néocrétacique accentue, dans les latitudes moyennes de l'hémisphère boréal, le mouvement de transgression qui n'avait cessé de se poursuivre depuis le néocomien, et dont l'apogée se produit au moment du dépôt de la craie blanche. En même temps, la mer vient visiter, en Afrique comme sur le bord oriental de l'Amérique du Sud, des parages où depuis longtemps elle ne s'était pas montrée. Par contre, les régions arctiques, si largement baignées par la mer lors de la transition du jurassique au crétacique, sont abandonnées par elle et il se dessine une grande terre qui, du Groenland oriental, semble se poursuivre sans discontinuité, par le Spitzberg et la Sibérie, jusqu'aux approches du Japon.

Après l'invasion de l'Europe et de l'Amérique du Nord par la mer de la craie, invasion la plus complète que l'histoire géologique ait enregistrée sur ces territoires depuis les temps primaires, la mer se retire rapidement, sans laisser de lagunes. La famille des ammonites disparaît, tandis que, sur les continents, l'épanouissement définitif des dicotylédones angiospermes prépare le régime tertiaire, à la faveur duquel la classe des mammifères pourra enfin prendre son essor.

Le sédiment caractéristique de cette période est la *craie*, roche blanche friable, composée de menus débris d'organismes calcaires, globigérines, polypiers, échinodermes, bryozoaires, etc., devenus plus ou moins méconnaissables par l'action dissolvante qu'a exercée la circulation prolongée des

eaux dans cette masse poreuse. La silice originairement mélangée à la boue crayeuse, sous forme de spicules d'éponges et de radiolaires, s'en est peu à peu séparée, en donnant naissance aux rognons de *silex*, si abondants d'ordinaire dans les assises de craie.

Très analogue aux vases actuelles à globigérines, la craie blanche n'est cependant pas une formation abyssale. Les fossiles qu'elle abrite dénotent une profondeur ne dépassant pas un petit nombre de centaines de mètres. Mais les mers au fond desquelles elle s'est déposée devaient être exemptes de trouble, et les rivages voisins n'ajoutaient presque aucun élément aux organismes calcaires dont les conditions physiques régnantes favorisaient le développement.

Pendant que la craie se dépose dans les latitudes moyennes, les régions méditerranéennes, demeurées plus pélagiques, voient se produire un nouveau mode d'activité organique. Les *rudistes*, héritiers des chamidés, deviennent les principaux artisans de la formation des assises calcaires, qui du reste s'éloignent de plus en plus du type normal des calcaires construits par les coraux pour prendre la forme d'amas lenticulaires, engendrés par la juxtaposition des cornets d'hippurites. Mais les rudistes eux-mêmes meurent avec la fin de la période et cèdent la place à d'autres organismes beaucoup plus petits, les *foraminifères*, dont le travail caractérisera la forme méditerranéenne des sédiments tertiaires.

Faune et flore néocrétaciques. — La rareté des dépôts néocrétaciques d'origine continentale explique qu'on sache peu de chose sur les vertébrés terrestres de l'époque. Cependant, grâce à l'Amérique, on constate une nouvelle acquisition dans l'embranchement : celle des grands oiseaux marcheurs, encore alliés par leurs dents aux reptiles, comme *Hesperornis* (fig. 118). Le premier serpent connu appartient à la période, à la fin de laquelle se montre aussi le grand *Mosasaurus* de Maëstricht.

Les genres *Actinocamax* et *Belemnitella* (fig. 119) ont succédé aux bélemnites proprement dites. Les ammonites, avant de s'éteindre, déploient encore une grande richesse de formes, d'abord avec *Schlœnbachia*, *Acanthoceras* (fig. 120), puis avec

Tissotia, *Placenticeras*, *Pachydiscus*; il y a encore des ammonitidés à tours déroulés, *Scaphites* (fig. 121), ou hélicoïdaux,

Fig. 118. — *Hesperonis regalis*.

Fig 119. — *Belemn tella quadrata*.

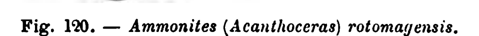


Fig. 120. — *Ammonites* (*Acanthoceras*) *rotomagensis*.

Heteroceras, *Turrilites*; enfin d'autres à coquille entièrement droite, *Baculites* (fig. 122).

Les oursins sont nombreux dans la craie, spécialement les genres *Micraster* (fig. 123, 124), *Hemiaster*, etc. Enfin, parmi

les rudistes abondent les genres *Hippurites* (fig. 125) et *Sphærulites* (fig. 126).

Le caractère de la flore crétacée consiste dans l'épanouissement définitif des plantes dicotylédones angiospermes, ou à

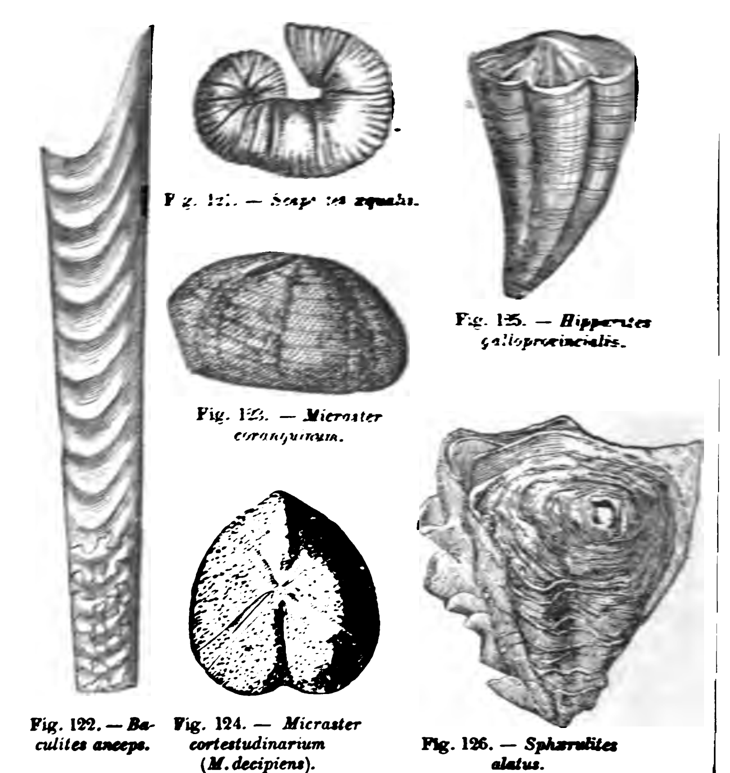


Fig. 121. — *Scaphites æqualis.*

Fig. 123. — *Micraster coranguinum.*

Fig. 125. — *Hippurites galloprovincialis.*

Fig. 122. — *Baculites anceps.*

Fig. 124. — *Micraster cortestudinarium* (*M. decipiens*).

Fig. 126. — *Sphærulites alatus.*

feuilles caduques, qui annoncent le jeu des saisons. Dès lors la flore de nos contrées présente la juxtaposition de deux catégories de types, les uns destinés à disparaître ou à être refoulés vers le sud, les autres devant former le fonds de notre végétation indigène. Ainsi les peupliers, les hêtres, les lierres, les châtaigniers et les platanes y sont associés aux

palmiers, aux lauriers, aux pandanées. D'ailleurs l'ampleur presque générale des formes de la période indique un ensemble de conditions très favorable au développement du monde des plantes.

De plus, quand on voit au Groenland, par 70° 45' Lat. N., une flore terrestre avec platanes, chênes et *Diospyros*, intercalée dans des couches marines à fossiles du néocrétacique supérieur, on ne peut mettre en doute la douceur du climat qui devait alors régner dans les plus hautes latitudes.

Divisions de la période. — Les divisions du néocrétacique, fondées au début sur la nature dominante des sédiments dans le bassin de Paris, étaient : la *craie glauconieuse*, la *craie marneuse*, la *craie blanche*, enfin le *calcaire pisolithique*. A ces dénominations, d'Orbigny a substitué celles d'étage *cénomanien* (du Mans), d'étage *turonien*, pour la craie marneuse bien représentée en Touraine, d'étage *sénonien* (de Sens); enfin d'étage *danien*, le type du néocrétacique supérieur paraissant réalisé au Danemark.

Nous conserverons ces divisions, mais en partageant le sénonien lui-même en deux étages : l'*emschérien* (de l'Emscher Grund en Westphalie) à la base, et l'*aturien* (de l'Adour), correspondant à la partie de la craie blanche que caractérisent dans le nord les bélemnitelles.

§ 7

SÉRIE NÉOCRÉTACIQUE
1° ÉTAGE CÉNOMANIEN

Données générales sur le cénomanien. — L'invasion dont les diverses phases des temps éocrétaciques avaient marqué les étapes devient, avec l'époque cénomanienne, un fait accompli. Partout en Europe la mer est en progrès et de nouveau la partie médiane du continent est réduite à la condition d'archipel. A peine si, en France, le Plateau Central émerge avec une partie du massif armoricain (fig. 127), tandis que l'Ardenne se laisse entamer. L'invasion n'est pas moins nette dans l'Amérique du nord. Aussi la *transgression cénomanienne*

a-t-elle été plus d'une fois présentée comme un des grands faits de l'histoire géologique. Cependant elle a un peu perdu de cette signification depuis qu'on connaît mieux la façon graduelle dont elle s'était préparée longtemps à l'avance, ainsi que l'absence de tout mouvement de même nature sur la majeure partie du continent asiatique.

Dans le cénomanien dominent, en fait d'ammonites, les

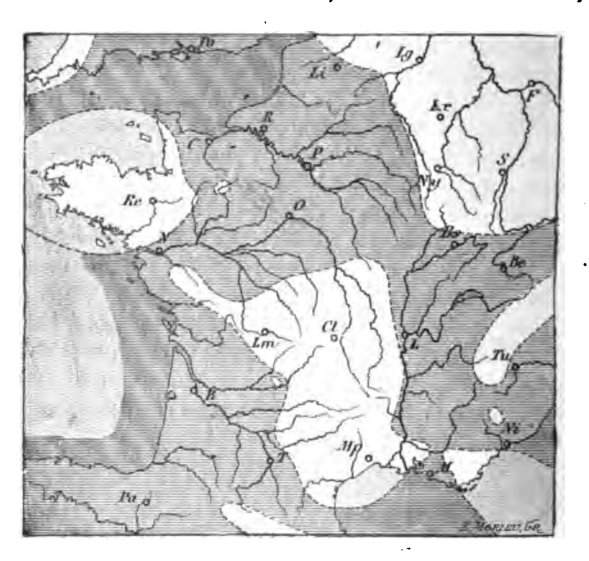


Fig. 127. — La France à l'époque cénomanienne.

genres *Acanthoceras* et *Schlœnbachia*. La région méditerranéenne voit prospérer les genres alliés aux chamacés, *Caprina*, *Caprotina*, ainsi que les premiers représentants des rudistes, tels que *Sauvagesia* et *Sphærulites*. Le foraminifère *Orbitolina* joue encore un grand rôle. La flore européenne est déjà riche en angiospermes, telles que les magnolias, les lauriers et le lierre.

Bassin de Paris. — Dans le bassin de Paris, le cénomanien a préparé la clarification des eaux et l'avènement du régime

crayeux. C'est seulement dans l'ouest, à partir du Berry et sur le bord de l'Armorique que l'étage se montre sous forme arénacée, exprimée par les *sables et grès du Maine*, à grandes trigonies, que couronne un cordon de marne blanche à grandes huîtres (*Ostrea columba, O. biauriculata*). En remontant vers le nord, on voit le facies du calcaire crayeux, moucheté de grains verts de glauconie, envahir la base du cénomanien, dont la partie moyenne reste à l'état arénacé (*sables du Perche*). Enfin, en Normandie, la transformation est complète, et tout l'étage est formé par une *craie glauconieuse* à silex (ancienne *craie chloritée* des auteurs), avec *Pecten asper*, *Acanthoceras Mantelli, Ac. rotomagense*. C'est cette craie, terminée par un lit très fossilifère, qui forme à Rouen l'escarpement de la côte Sainte-Catherine.

Mais l'assise change peu à peu vers le nord. Dans le Boulonnais, la glauconie est concentrée à la base, et le reste est à l'état de marne crayeuse grise, exploitée pour ciment. Il est vrai que, quand on se rapproche des anciens massifs du Brabant et de l'Ardenne, on voit le cénomanien prendre la forme d'un gravier glauconieux, témoignage de la transgression survenue, et que les mineurs saluent du nom de *tourtia*. Sa rencontre dans les sondages annonce la proximité du terrain carboniférien. Mais, en s'écartant de ces massifs, le cénomanien redevient d'abord argileux, puis calcaire, exempt de glauconie, comme dans la *craie ammonitifère* de l'Aube et le *tuffeau* à ammonites de l'Yonne. C'est seulement aux environs de Sancerre que se montre, dans la partie supérieure de ce tuffeau, la *marne à ostracées*, déjà vue dans le Maine, et indice d'une communication déjà ouverte avec la mer de l'Aquitaine, où ce facies est encore mieux développé.

Régions méditerranéennes. — En effet, le détroit ligérien, longtemps fermé, venait de se rouvrir, et les Charentes, un moment occupées par des formations d'estuaire à lignite (*gardonien*), étaient maintenant baignées par une mer où prospéraient les huîtres, les caprines, les rudistes et les orbitolines. C'est le régime méditerranéen, qui s'étendait au moins jusqu'à l'embouchure de la Loire, et faisait sentir son influence, d'un côté jusqu'au Perche, de l'autre jusqu'au Sancerrois.

Largement étendu sur toute la région pyrénéenne, ce régime se poursuivait par les Corbières et atteignait la Provence, où il entrait en contact, d'une part avec une influence septentrionale, amenant par le nord des fossiles de la craie de Rouen, d'autre part avec une influence encore plus méridionale, celle qui provoquait alors en Algérie et jusqu'en Syrie le dépôt des marnes à *Heterodiadema libycum,* avec grandes huîtres, constituant le facies *africano-syrien* de l'étage.

En revanche, à cette époque, le Dauphiné continuait à offrir des grès verts grossiers, attestant des conditions tout à fait littorales.

Europe septentrionale. — Revenons maintenant dans les régions du nord. L'Angleterre nous offrira, dans le *grès vert supérieur* et le *chloritic-marl,* un épisode littoral, précédant le régime marneux de la *craie grise.* Puis, en Westphalie, nous retrouverons, contre le massif houiller, un tourtia et des marnes plus ou moins glauconieuses (*plæner*), se poursuivant jusqu'à Lünebourg, où la fréquente apparition d'une petite bélemnite (*Bel. ultimus*) affirme la persistance des influences boréales, en même temps que l'application directe du cénomanien sur le trias porte témoignage de l'invasion marine. Enfin, en Saxe et en Bohême, le voisinage des anciens massifs se traduit par le facies arénacé que prend l'étage, devenu un grès, le *Quadersandstein,* débordant parfois sur le granite, dont il remplit les inégalités par un conglomérat grossier à végétaux terrestres.

Région alpine. Pays hors d'Europe. — Le cénomanien, le plus souvent calcaire, s'étend en Suisse tout le long des Alpes et se fond ensuite dans le grès de Vienne ou *grès carpathique.* On le revoit plus d'une fois en Transylvanie à l'état de conglomérat grossier, difficile à distinguer de l'albien. Mais il devient marneux ou sableux dans le sud-est de la Russie. Glauconieux au Caucase et en Perse, il apparaît en Inde, à Trichinopoly, avec une riche faune d'ammonites, spécialement riche en *Phylloceras* et *Lytoceras*, faune qui se retrouve à la fois au Japon, dans l'Afrique orientale et à Madagascar.

Dans le Texas et les Montagnes Rocheuses d'Amérique, le cénomanien occupe de grandes surfaces, étant formé par les *grès du Dakota,* où des restes de dicotylédones alternent avec

des couches marines, dans des conditions qui accusent la lente invasion par la mer d'une surface longtemps demeurée continentale. Les dépôts marins se poursuivent jusqu'en Californie et aux îles de la Reine-Charlotte, où ils recommencent à contenir des espèces d'ammonites attestant leur liaison avec la province indo-japonaise. Non loin de là, des gisements plus littoraux, situés dans la chaîne des Cascades, offrent une flore terrestre identique avec celle qu'on a découverte au même niveau à Atane (Groenland), à cette différence près que les palmiers, présents dans les gisements des Cascades, font défaut au Groenland.

§ 8

SÉRIE NÉOCRÉTACIQUE
2° ÉTAGE TURONIEN

Données générales sur le turonien. — Deux circonstances caractérisent l'époque turonienne : d'abord, dans le bassin anglo-parisien, la sédimentation crayeuse s'introduit définitivement; tout au plus la craie se mélange-t-elle d'un peu de sable et de mica aux approches du massif armoricain. Ensuite, dans la région méditerranéenne, la famille des rudistes se complète par l'apparition des *Hippurites*, qui vont jouer un grand rôle en Provence et dans les Pyrénées.

Les ammonites plus spécialement propres au turonien sont celles des genres *Mammites* et *Prionotropis*. Le genre *Pachydiscus* y débute. On peut distinguer deux sous-étages : celui du bas ou *ligérien* (de la Loire), niveau du *Mammites nodosoides* et aussi d'un inocérame très abondant, *Inoceramus labiatus* ou *problematicus* (fig. 128); celui du haut ou *angoumien* (d'Angoulême), qui dans le nord est caractérisé par *Scaphites Geinitzi*; tandis qu'au sud il voit l'éclosion des *Hippurites*, accompagnés de *Biradiolites cornupastoris*.

Bassin de Paris, Europe septentrionale. — Le turonien en Normandie est à l'état de craie marneuse, n'ayant de cordons de silex que dans le haut. Sa composition est à peu près semblable dans le Boulonnais, où la craie est à la fois marneuse et noduleuse.

Dans le Perche, le type marneux se poursuit, fournissant la chaux hydraulique de Senonches; mais déjà, dans le haut, on voit apparaître une craie sableuse et micacée. Ce facies se développe au sud, envahissant presque tout le ligérien, et donne le *tuffeau* (de Touraine), si remarquable par la finesse et l'égalité de son grain, tandis que, par-dessus, une craie jaune, abondante en nodules siliceux et en bryozoaires, représente l'angoumien, transformé près de Saumur en un grès siliceux.

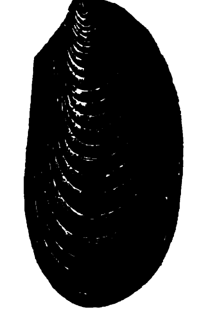


Fig. 128. — *Inoceramus labiatus.*

Toujours à l'état de craie marneuse en Champagne, où il fait face à l'extérieur du bassin de Paris par une ligne de falaises, bien visible à Rethel, l'étage se charge d'argile en approchant du nord, et engendre les *dièves* des mineurs, dont l'affleurement porte les belles prairies de la Thiérache.

En Angleterre, on retrouve le type du Boulonnais, c'est-à-dire une craie sans silex à la base, et une assise plus dure (*chalk rock*) avec silex au sommet.

Les marnes et calcaires marneux, parfois glauconieux, dominent dans le turonien ou *plæner* supérieur de Westphalie. Le même facies, parfois associé à un peu de grès, se revoit en Saxe et en Bohême, où le turonien, débordant le cénomanien, peut se trouver directement superposé au granite. Dans toutes ces régions d'ailleurs la faune devient assez uniforme.

Europe méridionale, Région alpine. Pays hors d'Europe. — C'est dans les Charentes que se prononce le facies à rudistes. Des calcaires ligériens à *Mammites Rochebrunei* y supportent la pierre de taille d'Angoulême et de Périgueux, à *Biradiolites*, dont l'équivalent se revoit dans la Chalosse. Aux Corbières, la même superposition se constate; mais ce sont les hippurites qui deviennent nombreuses dans l'angoumien, où l'entassement de leurs cornets fait naître des barres calcaires, en lentilles au milieu des marnes; il en est de même en Provence, au Beausset. A cette époque, le massif ancien des Maures envoyait au nord-ouest, à la rencontre des Cévennes,

un éperon indiqué par plusieurs gisements de végétaux terrestres. Cet éperon servait d'appui aux constructions hippuritiques, et sa pointe est marquée par l'apparition du facies arénacé (*grès d'Uchaux*). Les rudistes n'ont pas pénétré au nord de cette région, où l'abondance des conglomérats gréseux trahit l'instabilité et l'irrégularité des rivages dans le Dauphiné.

Le synclinal préalpin continuait à être occupé, de la Suisse aux Carpathes, par un bras de mer à sédimentation calcaire ou schisteuse; mais, sur le revers sud des Alpes, le régime hippuritique prévalait, s'avançant par moments jusque sur les îlots de la chaîne, comme il a fait à Gosau, près de Salzbourg et en plus d'un point de la Transylvanie, où les gastropodes de la famille des actéonelles et des nérinées alternent en bancs avec les lits à hippurites. Là aussi, il y a transgression du turonien sur les terrains anciens.

En Italie, c'est encore à l'état de calcaires à rudistes que le turonien est développé. Ce type s'étend sur la Sardaigne et la Sicile, sur la Dalmatie et l'Albanie. On le retrouve en Algérie, mais alors associé avec des marnes et calcaires, dont les ammonites ont des affinités avec certaines espèces qu'on a recueillies, dans le sud de l'Hindoustan, en compagnie de *Mammites* très voisins du *nodosoides* ainsi que d'*Inoceramus labiatus*.

Dans l'Amérique du Nord, la base du *groupe du Colorado*, débutant par des lignites, contient ensuite, dans des couches crayeuses, les fossiles du turonien marin. L'étage s'étend jusqu'au Minnesota, où on le voit directement appliqué sur les terrains primaires. Ainsi l'invasion marine continuait à progresser.

§ 9

SÉRIE NÉOCRÉTACIQUE
3° ÉTAGE EMSCHÉRIEN

Données générales sur l'emschérien. — C'est à l'époque emschérienne que la mer paraît avoir occupé le plus de place, non seulement en France, mais en Europe (fig. 129). Encore

est-il difficile de dire ce qu'elle pouvait laisser subsister des anciens massifs; car en plus d'un point on rencontre sur ces derniers, à une énorme distance des affleurements crayeux, des silex avec fossiles de l'étage, derniers débris d'une formation dont la dissolution par les eaux météoriques, pour-



Fig. 129. — L'Europe à l'époque emschérienne.

suivie pendant toute la durée des temps tertiaires, a fait disparaître tout autre élément.

Un fait très remarquable est l'énorme diffusion du facies crayeux, capable de se poursuivre depuis le Midi de la France jusqu'aux approches de la Scandinavie et de l'Écosse. Rarement il s'était produit une pareille uniformité de conditions. Mais la Méditerranée continuait à former une région à part, toujours réservée au travail des rudistes.

L'emschérien inférieur ou *coniacien* (de Cognac) voit apparaître, surtout dans le midi, une famille d'ammonites qui, par un très curieux retour du passé, présente des cloisons

semblables à celles des cératites du trias. Ce sont les *Tissotia*. L'emschérien supérieur ou *santonien* (de Saintes), est la zone à *Placenticeras syrtale*, accompagné de divers *Mortoniceras*. Dans le nord, où les coquilles d'ammonites n'ont été que très rarement conservées, c'est par des oursins du genre *Micraster* que se distinguent les deux sous-étages; au premier appartient *M. decipiens* (*M. cortestudinarium*); au second *M. coranguinum*.

Bassin de Paris, Touraine. — L'emschérien du bassin de Paris offre une composition très uniforme. Sa partie inférieure est plus riche en cordons de silex noirs, et c'est elle qui contient, en Picardie comme en Normandie, les assises de *craie noduleuse*, propre aux constructions. Le santonien est tantôt pourvu de petits silex cariés, tantôt à l'état de craie blanche tendre sans silex, où apparaissent en Picardie des bélemnitidés du genre *Actinocamax*. D'une façon générale, les silex sont beaucoup plus rares dans la craie de la Champagne.

Du côté de Chartres, et surtout dans le Perche, la craie blanche, sans perdre ses caractères extérieurs habituels, laisse voir quelques fossiles nouveaux, notamment des oursins, qui montrent que l'influence du bassin de l'Aquitaine se faisait sentir jusque là. Mais en Touraine, à Villedieu, la transformation est encore bien plus accusée. Tout l'emschérien, réduit à quelques mètres, est à l'état de calcaires durs et de marnes, riches en ammonites, localisées en des niveaux bien définis. *Micraster turonensis* y remplace *M. decipiens*, et l'apparition de quelques rudistes du genre *Sphærulites* affirme encore mieux les affinités méridionales.

Région méditerranéenne. — La source prochaine de ces dernières doit être cherchée dans les Charentes, avec lesquelles la Touraine communiquait par la région de l'embouchure de la Loire. Les calcaires, noduleux, marneux ou cristallins, des Charentes, renferment une riche faune, coniacienne à la base, santonienne au sommet; mais, dans l'étage supérieur, se montrent deux horizons d'*hippurites*. C'est donc là que commençaient, au moins d'une façon sporadique, les conditions physiques propres à ce mode spécial d'activité

zoogène, conditions qui demeuraient le privilège exclusif des régions méditerranéennes.

Ce régime reparaît dans les Pyrénées de la Haute-Garonne et dans les Corbières, puis dans le Gard, où les hippurites se montrent dès le coniacien, enfin en Provence, tant à Martigues qu'au Beausset. Partout les barres hippuritiques forment des accidents lenticulaires, au milieu de couches qui contiennent des ammonites et des oursins (notamment *Micraster turonensis*) ; et comme l'aspect extérieur des hippurites est très peu variable, il a fallu de patientes études de détail pour apprendre à distinguer les espèces, et à préciser leur distribution entre plusieurs niveaux définis. Au début, on les avait regardées comme à peu près identiques, en les attribuant toutes au turonien. Or elles se répartissent entre l'angoumien, le coniacien et le santonien, sans préjudice de celles que nous verrons monter dans l'aturien.

Un fait intéressant est la juxtaposition qui s'opère, dans le midi de la France, entre le facies hippuritique méditerranéen et celui des craies à *Micraster* du nord. Tandis que, à l'abri de l'éperon occidental des Maures, les rudistes prospéraient en Basse Provence, des courants, issus du bassin de Paris, et longeant un synclinal subalpin, amenaient jusqu'à Nice le *Micraster coranguinum*, déposant au passage les calcaires blancs à silex de la Drôme.

Europe du nord. Région alpine. — C'est le facies typique de la craie qui prévaut en Angleterre, où le santonien est généralement dépourvu de silex.

Ce facies s'étend à l'Allemagne du nord, où on le retrouve à Helgoland. Mais en Westphalie, en bordure du massif rhénan, alors émergé, la sédimentation se montre plus littorale, sous la forme des marnes, en partie glauconieuses, de l'Emscher Grund, capables de se changer par endroits en roches quartzeuses. Ce type littoral est encore bien mieux caractérisé à Aix-la-Chapelle, où l'emschérien est formé de sables et d'argiles avec végétaux terrestres. Le facies arénacé se reproduit en Bohême, à la hauteur du santonien, se traduisant par le *Quadersandstein* supérieur, qui donne naissance aux rochers si pittoresques de la Suisse saxonne.

Dans la région des Alpes orientales, on voit reparaître, notamment à Gosau, des conditions semblables à celles du turonien; c'est-à-dire que des bancs à hippurites s'y montrent, alternant avec des marnes avec ammonites. La proximité du rivage est attestée par des couches saumâtres avec bancs de lignite, et le même fait se reproduit en plus d'un point de la Hongrie et des Balkans, tandis qu'en Italie le régime est plus franchement marin.

Afrique, Asie, Amérique. — Calcaire et marneux en Algérie, où les ostracées continuent à prospérer comme elles avaient fait précédemment, l'emschérien se revoit en Égypte, en Palestine, en Perse, en Inde, à Madagascar et dans l'Afrique orientale.

La mer emschérienne a couvert de grandes surfaces dans l'Amérique du Nord. Au Texas, elle a déposé une véritable craie, et, dans le voisinage des sources du Missouri, ses traces sont demeurées sous la forme des schistes et des calcaires du Niobrara, dont la partie moyenne contient des rudistes, tandis qu'au sommet apparaît une couche littorale avec ossements d'*Hesperornis*. Au Canada, le facies est également littoral, comme en témoignent d'importants gisements de charbon.

§ 10

SÉRIE NÉOCRÉTACIQUE
4° ÉTAGE ATURIEN

Données générales sur l'aturien. — C'est avec l'aturien que finit la grande invasion des mers de la craie. L'établissement du nouveau régime se traduit par plus de variété dans les sédiments, mais surtout par la fréquente apparition, dans le midi, du facies d'estuaire, tandis qu'au nord les *craies phosphatées* révèlent aussi des conditions littorales, précédant la localisation tout à fait étroite des mers de l'aturien supérieur.

Dans le nord, l'époque aturienne est par excellence l'ère des genres *Actinocamax*, *Belemnitella*, issus des régions septentrionales, où ils atteignent leur maximum de développement.

L'aturien inférieur ou sous-étage *campanien* (de la Champagne charentaise) est caractérisé, en fait d'ammonitidés, par *Pachydiscus neubergicus* et *Heteroceras polyplocum*. L'aturien supérieur ou *maëstrichtien* (*dordonien* de Coquand) voit prédominer les genres *Baculites* et *Scaphites*, ainsi que les oursins du genre *Hemipneustes*. Il est très curieux de voir, à cette époque, les rudistes, sphérulites, radiolites et même hippurites, pénétrer jusque dans les régions du nord, ainsi au Limbourg.

Le maëstrichtien est aussi l'époque où se prononce, parmi les foraminifères, l'épanouissement du genre *Orbitoïdes*.

Bassin de Paris, Limbourg. — Le régime crayeux, qui s'était définitivement installé, dans le bassin de Paris, avec le santonien, trouve son expression la mieux caractérisée avec l'aturien, dans la *craie blanche à bélemnites*, roche tendre, traçante, et qui après lavage est propre à la fabrication du *blanc de craie*.

Les silex, qui étaient devenus rares avec le santonien, reparaissent en général dans cette craie blanche, qui peut se partager en deux assises, savoir : la craie de Reims et d'Épernay, à *Actinocamax quadratus* et la *craie de Meudon*, à *Belemnitella mucronata*. Cette dernière peut être regardée comme la base du maëstrichtien, dont l'équivalent se trouve au Cotentin, aux environs de Valognes, sous la forme, non plus de craie, mais de *calcaire jaune à baculites*.

En Picardie, des grains de phosphate apparaissent à la base de la craie à bélemnitelles; c'est la décalcification de cette assise qui a engendré les sables phosphatés riches de la contrée. Dans le Hainaut, la craie phosphatée correspond à un niveau plus élevé, et précède immédiatement, à Ciply, le *tuffeau de Saint-Symphorien*, équivalent du *tuffeau de Maëstricht*, très riche en bryozoaires, avec scaphites, baculites, rudistes, *Hemipneustes* et *Orbitoides*. Il s'agit donc ici d'un mode de sédimentation très localisé.

Allemagne. Région alpine. — Autour d'Aix-la-Chapelle, et sous l'influence du voisinage du massif rhénan, l'aturien s'ensable comme avait fait l'emschérien, mais sans cesser de contenir des bélemnitelles. La vase calcaire reparaît en

Westphalie, avec des fossiles qui accusent des conditions plus pélagiques que dans le bassin de Paris; ainsi les ammonitidés caractérisent la *craie de Haldem*, qu'on retrouve jusqu'à l'île de Rügen, et les mêmes espèces se recueillent en Galicie dans la *craie de Lemberg*.

Cette mer aturienne à céphalopodes faisait sentir son influence dans les Alpes bavaroises et les Carpathes, sans exclure, notamment à Gosau, le retour accidentel du régime hippuritique, toujours florissant dans la zone méditerranéenne, notamment dans le Frioul.

En revanche, des courants issus du bassin de Paris, et suivant la même voie que ceux du santonien, déterminaient dans le Dauphiné la formation de dalles ou *lauzes* à bélemnitelles, localisées dans un détroit subalpin qui rejoignait à Nice la mer méditerranéenne.

Provence, Languedoc, Aquitaine. — A l'ouest de ce détroit, il s'était établi, depuis la fin du santonien, un isthme reliant les Cévennes au massif des Maures, lequel, largement étalé dans la direction de Marseille, envoyait, suivant le littoral actuel du Languedoc, un long promontoire jusqu'aux sources de la Garonne. De cette manière, la Provence et le Languedoc, isolés de la mer, abritaient une longue bande de lagunes, d'abord saumâtres, puis d'eau douce. Dans ces lagunes s'est entassée la *série de Fuveau*, avec ses couches d'un lignite qui est presque de la houille, et où abondent les débris de végétaux de marais et de rivières. Et après le dépôt de ces couches campaniennes est venu celui d'un calcaire lacustre à gastropodes des genres *Lychnus* et *Physa*.

La longue bande des lagunes languedociennes venait déboucher à l'ouest dans un golfe de la mer qui couvrait alors toute l'Aquitaine. Aussi voit-on les marnes marines avec hippurites, cette fois campaniennes, apparaître à la Montagne des Cornes, près de Rennes-les-Bains, ainsi que dans l'Ariège, à Leychert, étant recouvertes par l'épisode arénacé du *grès d'Alet*. Le caractère marin se prononce encore mieux dans la Haute-Garonne, à Ausseing, où un calcaire marneux à *Pachydiscus neubergicus* contient aussi une lentille hippuritique et supporte un *calcaire-nankin* à *Orbitoïdes* et *Hemipneustes*. Enfin

c'est dans la Chalosse, sur le prolongement continental de la fosse sous-marine de l'Adour, que l'aturien se montre le plus franchement marin. Les céphalopodes de Haldem existent dans les calcaires bleuâtres de Tercis, en compagnie d'oursins spéciaux, et sans rudistes.

Pour retrouver ces derniers, il faut s'éloigner de la région pélagique en se dirigeant vers l'ancien détroit poitevin, désormais fermé d'une façon définitive. Alors, au-dessus de la craie blanche campanienne de Royan, on voit se développer les calcaires et les sables *dordoniens*, avec *Orbitoïdes*, *Hemipneustes* et divers rudistes, notamment des hippurites. Évidemment cette région devait être en communication avec le Limbourg, mais par une voie qu'il serait aujourd'hui bien difficile d'indiquer avec précision.

Asie, Afrique, Amérique. — La mer aturienne, avec accidents hippuritiques, passait sur l'Asie Mineure comme au Sinaï, puis en Perse et dans le Baloutchistan, où une faune très voisine de la faune maëstrichtienne se trouve en compagnie d'un gros oursin du genre *Noetlingia*. Cet oursin a été recueilli en plein Sahara oriental, près de Bilma, ce qui prouve qu'à cette époque, la mer qui se retirait de notre Europe formait en Afrique un golfe profond.

Le sud de l'Hindoustan, aux environs de Trichinopoly, continuait à être visité par une mer à *Pachydiscus* et *Lytoceras*, dont les espèces se retrouvent au Japon et à Sakhalin d'un côté, en Patagonie, sur la terre antarctique (île Seymour), à Madagascar et à Natal de l'autre. D'ailleurs, par Vancouver, cette mer se reliait à celle qui, dans les Montagnes Rocheuses, déposait la *série du Montana*, à *Baculites*, *Scaphites* et *Heteroceras*. De là, par le Texas, la mer atteignait l'Atlantique, qui jetait sur le New-Jersey des sables glauconieux à bélemnitelles et baculites.

Enfin la mer américaine a touché le Groenland occidental où, par 70° 45′ de latitude, une flore terrestre à *Diospyros* est associée à des fossiles de la série du Montana.

§ 11

SÉRIE NÉOCRÉTACIQUE
5° ÉTAGE DANIEN

Données générales sur le danien. — L'étage danien forme un terme de passage entre le néocrétacique et le tertiaire. Intimement lié au premier par sa distribution géographique, il s'en distingue parce qu'il ne contient plus d'ammonites. C'est d'ordinaire par un nautile, *Nautilus danicus*, qu'on le caractérise. Il est à remarquer qu'à l'époque danienne les algues calcaires du genre *Lithothamnium* ont prospéré dans nos régions.

Le *montien*, ainsi nommé du calcaire de Mons en Belgique, constitue le terme supérieur du danien. C'est là surtout que se prononcent les affinités tertiaires.

Le *garumnien* du midi de la France est la forme pyrénéenne du danien. Le type exclusivement marin de l'étage, réalisé dans la Chalosse, affirme son caractère de transition par la coexistence de formes crétacées d'oursins, telles que *Micraster tercensis*, avec des foraminifères, operculines et miliolites, qui annoncent le tertiaire.

C'est dans le danien de la Catalogne qu'apparaît la dernière hippurite.

Danemark, Hainaut, Bassin de Paris. — Le type du danien est le calcaire jaune de Faxe (Danemark), pétri de bryozoaires. Ce calcaire, où l'on observe un polypier voisin du corail rouge, est parfois aussi à l'état de véritable craie à silex.

Le même horizon, caractérisé par des bryozoaires d'affinités crétacées, se retrouve au Hainaut dans le *tuffeau de Ciply*. Tout près de là, sous la ville de Mons, les puits traversent un calcaire pétri de foraminifères et de débris d'algues. C'est le *calcaire de Mons*, avec grands cérithes à la base, et nombreux fossiles, dont les uns sont des oursins crétacés, et les autres des gastropodes de facies tertiaire. La présence de plusieurs genres d'eau douce accuse un estuaire.

Dans le bassin de Paris, le danien est représenté par ce qu'on appelait autrefois le *calcaire pisolithique*. Il n'y a que très peu de gisements de ce calcaire, comme ceux de Montereau, qu'on puisse assimiler au danien de Faxe. Tous les autres appartiennent au montien et forment deux séries : la série inférieure est constituée par des calcaires concrétionnés où dominent les débris d'algues (*Lithothamnium*), et se rencontre en petits lambeaux au milieu de la craie aturienne (Vigny, Laversine). La série supérieure, dont fait partie le calcaire pisolithique de Meudon, débute par un banc à foraminifères, petits oursins et grands cérithes, que couronnent des marnes avec blocs corrodés, où l'on recueille les gastropodes du calcaire de Mons, c'est-à-dire un mélange de potamides saumâtres et de physes d'eau douce. C'est donc un mouvement de retraite de la mer qui s'accentue, et pour cette raison il paraît convenable de maintenir le montien dans le néocrétacique.

Région méditerranéenne et alpine. — En dehors du bassin de Paris, on ne trouve plus le danien que dans le Midi. Encore, de la Provence à l'Ariège, n'est-il représenté que par des formations d'eau douce, à savoir les *argiles rutilantes* de la Provence et du Languedoc, surmontées par le calcaire lacustre à *Lychnus* et à *Bauxia* de Rognac (*rognacien*). Cet étage est riche en ossements de grands reptiles, notamment de dinosauriens, dont quelques-uns sont alliés aux *cératopsidés* de l'Amérique du Nord.

A partir de l'Ariège, des couches marines s'intercalent dans les calcaires lacustres, et ces intercalations se prononcent dans la Haute-Garonne, où le *calcaire lithographique* à *Bauxia*, surmontant des couches saumâtres avec cyrènes, est associé à des lits marins avec *Micraster tercensis*. C'est que, de plus en plus, on pénètre dans le golfe aquitanien. En effet, dans l'ouest, le facies mixte du *garumnien* disparaît et, dans la Chalosse, on ne trouve plus, toujours en prolongement de la fosse de l'Adour, qu'un type exclusivement marin, celui des calcaires marneux de Tercis et d'Angoumé, avec *Micraster tercensis* et autres oursins des genres *Ananchytes*, *Isaster*, etc. ; le tout accompagné, depuis l'Ariège, d'operculines et de miliolites.

Mais les conditions garumniennes se reproduisaient de l'autre côté de l'axe émergé des Pyrénées-Orientales, en Catalogne, ramenant des calcaires à *Lychnus*, avec accidents hippuritiques.

D'autre part, au même moment, les sphérulites persistaient au Frioul, parfois entremêlés de miliolites, dans des assises où le passage est graduel du néocrétacique au tertiaire.

Le mouvement d'émersion accusé par le garumnien de la Provence et des Pyrénées s'est fait sentir aussi dans les Alpes-Orientales et la Hongrie. La preuve en est donnée par les couches à lignites d'Ajka (Hongrie), où se rencontre un gastropode spécial, *Pyrgulifera*, que nous retrouverons au même niveau en Amérique. Probablement les couches à dinosauriens de Gosau correspondent aussi à celles du Languedoc.

Asie, Amérique. — La mer danienne a passé près du Caucase ainsi qu'au Louristan (Perse occidentale) et au Turkestan. Elle a laissé des traces en Inde, d'abord dans le Sind, sous forme de couches à *Cardita Beaumonti*, ensuite près de Trichinopoly, où les couches de Ninnyoor renferment *Nautilus danicus*.

En Amérique, l'époque danienne a vu s'accomplir la retraite de la mer où s'étaient déposées les couches aturiennes. A celles-ci succèdent, dans le Wyoming, les célèbres *couches de Laramie*, avec lits importants de combustibles, et ossements de vertébrés terrestres, notamment des curieux *Cératopsidés*. Des fossiles marins et saumâtres, parmi lesquels le gastropode *Pyrgulifera*, apparaissent dans cette série, où se fait, tant par la faune que par la flore terrestre, un passage progressif au tertiaire, en même temps que la mer quitte pour toujours la région.

§ 12

ÉRUPTIONS DE L'ÈRE SECONDAIRE

Éruptions proprement dites. — L'ère secondaire, dans l'Europe occidentale, a été particulièrement pauvre en manifestations de l'activité interne. Ce n'est guère qu'à l'époque

triasique qu'il paraît y avoir eu de vraies éruptions. La base du trias alpin est souvent formée par un grès qui est un véritable tuf de porphyre quartzifère, et dans le Tyrol (fig. 130), des épanchements d'une *granulite à tourmaline*, d'une *syénite*, d'un *porphyre pyroxénique*, d'un *mélaphyre* et d'une *porphyrite* ont plus d'une fois interrompu le dépôt des couches du trias supérieur. De même, des nappes d'*euphotide* ou roche granitoïde à lamelles de diallage, se changeant sur les bords en *variolite*, se sont fait jour dans le trias des Alpes, et d'autres roches basiques de couleur verte, rangées dans la catégorie

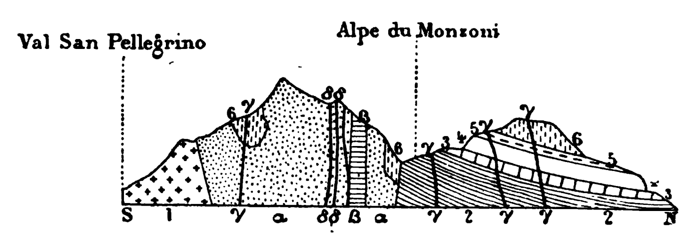


Fig. 130. — Le massif éruptif du Monzoni (Tyrol). — 1, porphyre quartzifère; 2, 3, 4, 5, 6, couches triasiques; α, syénite dite monzonite; β, porphyre pyroxénique; γ, mélaphyre; δ, porphyrite.

des *ophites*, ont apparu à la même époque dans le massif pyrénéen.

Pendant ce temps, des nappes de *mélaphyre* se répandaient au milieu des couches triasiques des États-Unis, dans le Connecticut.

Dans l'Europe orientale, notamment en Silésie, il paraît y avoir eu quelques éruptions de roches basiques, analogues aux *diabases*, vers le milieu de l'époque crétacée. D'autres éruptions, d'âge secondaire, se sont fait jour en Crimée et en Volhynie, et c'est sans doute à la même date qu'il faut rapporter les épanchements granitoïdes, de nature *syénitique*, du Banat autrichien.

Mais c'est surtout dans les Andes de l'Amérique du Sud que l'activité éruptive semble s'être dédommagée, en quelque sorte, du silence qu'elle s'imposait dans nos pays pendant les temps jurassiques et crétacés. D'énormes émissions *porphyri-*

tiques, en coulées et en nappes, partiellement sous-marines, et accompagnées de tufs fossilifères, ont eu lieu entre le 13e et le 33e degré de latitude méridionale. Il est à remarquer que des éruptions de même nature se sont produites en Afghanistan pendant l'époque jurassique. Le néocomien y est presque entièrement constitué par des débris de ces porphyres. Comme d'ailleurs les *porphyrites* de l'État de Montana sont attribuées au jurassique et que, dans le Colorado, une masse de *porphyres* et de *porphyrites* apparaissent dans des conditions qui semblent placer leur sortie vers la fin des temps crétacés, on voit que les manifestations volcaniques sont loin d'avoir fait défaut pendant l'ère secondaire, ainsi qu'on a pu le croire longtemps d'après les observations relatives à la France et aux pays voisins.

Phénomènes thermaux. — Postérieurement aux épanchements que nous avons signalés, il paraît y avoir eu, surtout en Europe, des phénomènes *thermaux*. Ainsi, le trias du Morvan est parcouru par de gros filons de quartz et certains sédiments liasiques ont été entièrement silicifiés par des émanations semblables. En même temps il se déposait des substances métalliques. Les mouches de *carbonate de cuivre* abondent dans le trias et l'arkose rhétienne. Parfois, la *galène* ou sulfure de plomb remplit les couches du calcaire à gryphées arquées, attestant que les filons de plomb argentifère du Morvan, comme ceux du Hartz et de la Saxe (du moins en partie), résultent d'émanations immédiatement postérieures au trias et ayant suivi les grandes éruptions primaires, à peu près comme les solfatares et les sources thermo-minérales suivent aujourd'hui les manifestations violentes du volcanisme.

CHAPITRE VII

ÈRE TERTIAIRE
SYSTÈME ÉOGÈNE

---

§ 1

GÉNÉRALITÉS SUR L'ÈRE TERTIAIRE

Caractères généraux de l'ère tertiaire. — L'ère tertiaire ou *néozoïque* peut être définie d'un mot : c'est celle où les conditions physiques et biologiques, jusqu'alors remarquablement uniformes, se sont différenciées au point de produire la variété qui caractérise l'ère moderne. A la fin des temps crétaciques, l'Europe, réduite à un petit massif central et pourvue d'un faible relief, commençait à prononcer un mouvement d'émersion. A travers de nombreuses vicissitudes, ce mouvement va désormais s'accentuer, et les diverses phases en seront marquées par le soulèvement de hautes chaînes de montagnes. Tandis qu'au voisinage de la dépression méditerranéenne les dépôts garderont en général le caractère marin, dans les contrées septentrionales une large part sera faite à l'élément lacustre ou saumâtre, et peu à peu la mer sera rejetée dans ses limites actuelles. La zone chaude, après avoir longtemps défendu l'intégrité de son domaine, reculera tout à fait vers le sud; il suffira bientôt de la différence de latitude qui sépare la Provence de l'Angleterre pour passer d'une flore subtropicale à des forêts de conifères, en attendant que le refroidissement polaire gagne de proche en proche, et entraîne la retraite de tous les végétaux qui ne peuvent s'accommoder des longs hivers.

L'accroissement des masses continentales et la variété des conditions qu'elles offrent désormais se traduisent par un changement notable dans les faunes et les flores terrestres.

On y voit apparaître cette complication organique qui caractérise le progrès physiologique, comme la division du travail est le signe du perfectionnement des civilisations matérielles. Les mammifères, longtemps atrophiés, se développent avec une vigueur extraordinaire et prennent possession du globe, tandis que le monde végétal déploie, avant l'invasion finale des froids septentrionaux, une ampleur et une diversité jusqu'alors inconnues. Le règne des gymnospermes est fini; la prépondérance appartient aux palmiers et aux arbres à feuillage caduc, dont le milieu de l'ère tertiaire verra l'apogée. Dans les mers, les céphalopodes ne jouent plus qu'un rôle restreint, les brachiopodes sont pauvrement représentés, et la famille des ammonitidés a dit son dernier mot. En revanche, les lamellibranches abondent et avec eux les gastropodes, dont le développement s'explique par le caractère littoral de la plupart des formations de l'époque aujourd'hui émergées. Dans les régions plus franchement marines, les foraminifères prospèrent, du moins au début de la période, et édifient des assises calcaires qui deviennent la forme tertiaire du régime méditerranéen, comme les bancs à rudistes en avaient été la forme secondaire. Les faunes locales se multiplient, sous l'empire de conditions extérieures chaque jour plus diversifiées, préparant la variété des provinces zoologiques modernes.

En même temps l'activité interne, endormie en Europe pendant de longs siècles, se réveille en donnant lieu, sur toute la surface du globe, à des manifestations grandioses, dont les phénomènes volcaniques actuels ne sont plus qu'un écho très affaibli. Les anciennes fentes de l'écorce se rouvrent; de nouvelles crevasses prennent naissance, et, sur les parois des unes et des autres, les émanations internes déposent des matières diverses, où dominent l'or et l'argent. Ainsi, peu à peu, la terre se prépare pour recevoir dignement l'être qui doit régner en maître à sa surface.

Divisions de l'ère tertiaire. — L'ère tertiaire ou *néozoïque* a été divisée par Lyell en trois périodes, dites *éocène*, *miocène* et *pliocène*[1], et distinguées les unes des autres d'après la pro-

1. *Éocène* vient de *eós*, aurore, et *kainos*, récent; c'est l'aurore des

portion des formes actuelles de coquilles que renferment leurs faunes respectives.

Le progrès des observations a conduit quelques géologues à proposer la création de nouveaux termes, tels que celui de *paléocène* pour les premiers dépôts tertiaires, et d'*oligocène* (dérivé de *oligos*, peu) pour la période de transition entre l'éocène et le miocène, empiétant à la fois sur l'une et sur l'autre.

Aujourd'hui on s'accorde généralement à reconnaître qu'il suffit de partager les temps tertiaires en deux grands systèmes : le premier ou système *éogène*, subdivisé lui-même en série *éocène* et série *oligocène*, correspond à un état de choses encore très différent, par la géographie et par la faune, de l'état actuel. Le second système, dit *néogène*, débute par un grand mouvement de transgression, inaugurant les plissements alpins et, avec eux, la transformation organique d'où résulteront la faune et la flore du temps présent. A son tour, il peut être divisé en série *miocène* et série *pliocène*.

§ 2

GÉNÉRALITÉS SUR LA SÉRIE ÉOCÈNE

Traits généraux de l'éocène. — La période éocène a vu se produire un effort caractérisé des continents, et en particulier de l'Europe, pour conquérir leurs dimensions et leur relief actuels. Si, au début, une transgression marine se fait sentir, du moins est-elle localisée et, presque partout, les sédiments éocènes attestent la lutte de l'Océan et de la terre ferme, notamment dans les contrées du Nord, où abondent les formations d'eau douce, destinées à s'étendre de plus en plus au sud jusqu'à l'époque du soulèvement des Pyrénées.

Mais cette lutte n'a pas lieu dans le bassin de la Méditerranée, où les formations marines gardent quelque chose du

formes actuelles; *miocène* indique une proportion d'espèces modernes moindre (*meion*, moins) que celle du *pliocène* (*pleion*, plus); *oligocène* vient de *oligos*, peu.

caractère particulier qui distinguait cette région pendant les périodes antérieures; c'est-à-dire qu'on y voit dominer, se poursuivant sur de grandes étendues, des calcaires à la construction desquels les organismes ont pris une part notable. Seulement ce n'est plus à des dicérates ni à des rudistes que cette tâche est dévolue; c'est à de simples protozoaires et surtout aux *nummulites*, qui ont mérité d'imposer leur nom à l'ensemble de l'éocène méditerranéen ou *terrain nummulitique*.

Au moment où s'ouvre la période éocène, le climat de l'Europe est tempéré plutôt que très chaud; l'hiver est encore nul ou presque nul et la végétation continentale paraît ne pas éprouver de variations sensibles entre le 40e et le 60e degré de latitude. Mais bientôt, sur l'Europe méridionale, la mer nummulitique s'installe dans de longs sillons. L'Europe revêt alors une physionomie africaine. Sous l'influence d'une mer chaude, touchant au tropique vers le sud, s'établit un régime de saisons sèches et brûlantes, alternant avec des saisons pluvieuses et tempérées, la température moyenne annuelle étant d'environ 25° sous la latitude de la Provence. Alors se trouve réalisée la plus grande élévation thermique que l'Europe ait connue dans les temps tertiaires. Les palmiers abondent en France, les cocotiers ou des arbres analogues prospèrent en Angleterre et les arbres à feuilles caduques semblent encore relégués sur les hauteurs, d'où ils ne descendront qu'à la fin de l'éocène. La période s'achève à peu près dans ces conditions, sans que les régions les plus voisines du pôle cessent de nourrir une végétation qui témoigne d'une moyenne annuelle supérieure d'une vingtaine de degrés à celle que l'on constate de nos jours dans les mêmes parages.

C'est avec l'éocène que commence le développement des mammifères. Les *pachydermes* sont prépondérants et représentés par des animaux analogues aux tapirs, dont les principaux sont : à la base de la série, *Coryphodon*; au milieu, *Lophiodon*; au sommet, les précurseurs de *Palæotherium*, l'animal du gypse parisien. Les poissons de la famille des *squales* abondent. Parmi les sédiments littoraux pullulent les individus du grand genre *Cerithium* (fig. 131, 132, 133), avec sa section *Potamides*, ainsi que les *turritelles*

(fig. 134). Enfin les plus caractéristiques des foraminifères éocènes sont les *nummulites* (fig. 135), ainsi nommées de leur



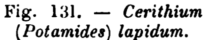


Fig. 131. — *Cerithium (Potamides) lapidum.*

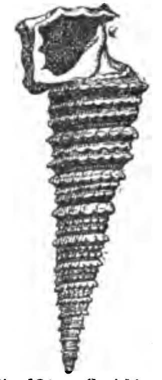


Fig. 132. — *Cerithium tricarinatum.*



Fig. 133. — *Cerithium mutabile.*

ressemblance avec des pièces de monnaie et capables de constituer par leur accumulation des bancs entiers, privilège



Fig. 134. — *Turritella fasciata.*



Fig. 135. — Coupes de Nummulites dans un calcaire.

qu'elles partagent avec d'autres protozoaires, tels que les *alvéolines*, en forme de fuseaux, les *miliolites*, semblables à des grains de millet, et les *Orbitoides* appartenant à la section dite *Orthophragmina*.

Divisions de la série éocène. — Les ammonites n'ayant pas survécu aux temps secondaires, le critérium qui depuis si longtemps nous servait pour la différenciation des étages cesse de pouvoir être appliqué. Les divisions paléontologiques des terrains tertiaires ne sont donc pas exactement comparables à celles des périodes antérieures et n'ont pas la même valeur.

Heureusement, d'une part, les sédiments de cet âge ayant été moins complètement dispersés par l'érosion, on peut faire intervenir avec plus de fruit la considération des changements survenus dans le contour des rivages aux diverses époques. D'autre part, l'étude attentive des nummulites et autres foraminifères a enfin permis de fonder, sur ce groupe d'êtres inférieurs, une division applicable aux types pélagiques de la série éocène. De plus, le développement rapide et subit que prend, avec le tertiaire, la classe des mammifères, et l'ordre remarquable qui préside à la succession des types, fournissent, pour les gisements d'eau douce de la période, les éléments d'une classification qui s'harmonise bien avec la précédente.

Les étages inférieurs de l'éocène, autrefois réunis en un seul par d'Orbigny sous la dénomination de *suessonien* (du Soissonnais), sont : le *landénien*, de Landen, dont la partie supérieure forme le *sparnacien* (d'Épernay), et l'*yprésien* (d'Ypres en Flandre).

Ensuite viennent le *lutétien* (de Lutèce), partie inférieure de l'ancien étage parisien et le *bartonien* (de Barton en Angleterre); ce dernier étage étant pris dans son sens le plus large, de façon à comprendre l'ancien étage *priabonien* (de Priabona en Vicentin), équivalent du *ludien* (de Ludes dans la montagne de Reims).

La caractéristique paléontologique de chacun de ces différents étages sera indiquée aux paragraphes correspondants.

§ 3

SÉRIE ÉOCÈNE
1° ÉTAGE LANDÉNIEN

Données générales sur le landénien. — Le début du landénien, ou *thanétien* (de l'île de Thanet en Angleterre), marque une date importante pour l'histoire du bassin anglo-parisien. La mer, qui avait quitté ce bassin, y revient par le nord, jetant sur la craie des sables fins, glauconieux, où l'influence septentrionale se trahit par la présence de certains genres de cyprines et d'astartes, alliés à ceux des mers boréales actuelles. *Cyprina Morrisi*, *Pholadomya Konincki*, sont les espèces les plus fréquentes à ce niveau, où l'on trouve aussi des céphalopodes cloisonnés du genre *Aturia*.

Cette mer n'atteint pas la latitude de Paris, et sur son bord, en Champagne, se sont développées diverses formations de rivage, dont une est intéressante par sa riche faune de mammifères, qui a reçu le nom de faune *cernaysienne*, parce qu'elle a son principal gisement à Cernay près de Reims. De petites espèces, encore alliées aux mammifères secondaires, les didelphes *Neoplagiaulax*, *Phenacodus*, etc., y sont associées à des placentaires très primitifs, comme *Arctocyon*, en compagnie d'oiseaux marcheurs, *Gastornis*. Des associations tout à fait semblables se voient au même moment dans les Montagnes Rocheuses d'Amérique.

Les traces de la mer thanétienne se retrouvent dans le sud de l'Aquitaine, où la transition est continue des dernières assises crétaciques aux calcaires à foraminifères (operculines et miliolites) de la base de l'éocène. Le même passage ménagé s'observe dans la région libyque et dans l'Inde, où les premières nummulites apparaissent à cette hauteur.

A la phase marine du thanétien succèdent les épisodes fluvio-marins du sparnacien, avec lesquels apparaissent les mammifères *Coryphodon* et *Lophiodon*.

On ne connaît pas, jusqu'à présent, de nummulites dans le landénien du nord. Celui du midi contiendrait *Numm. spileccensis*.

Types septentrionaux du landénien. — Le thanétien de l'île de Thanet et du nord de la France ou *landénien* inférieur de la Belgique est un sable glauconieux, parfois aggloméré en *tuffeau*, qui souvent repose sur la craie par l'intermédiaire d'une couche de silex à peine roulés, à patine verte. Très riches en fossiles à Bracheux, près de Beauvais, ces sables deviennent blancs en Champagne, à Châlons-sur-Vesle, où ils sont encore très fossilifères. Mais à Rilly, le voisinage de la côte est attesté par des cordons de galets et un calcaire d'eau douce avec gastropodes du genre *Physa*. Non loin de là, au Mont de Berru, près de Reims, l'assise, devenue lacustre, est couronnée par le conglomérat argileux de Cernay, où abondent les restes de la faune de vertébrés dont nous avons parlé. Enfin, à Sézanne, un travertin du même âge, engendré par une cascade qui traversait la craie, est riche en empreintes de plantes dicotylédones offrant quelques affinités tropicales.

Vers la fin du landénien, toute la surface du golfe anglo-parisien fait place à des lagunes saumâtres, et le régime marin franc est rejeté assez loin pour qu'on n'en observe aucun vestige dans le nord de l'Europe. Les lagunes, où les huîtres réussissent parfois à s'établir jusqu'à la latitude de Compiègne, sont d'ailleurs entourées par une ceinture d'étangs, où se forment des dépôts d'eau douce qui, à diverses reprises, empiètent plus ou moins sur le régime lagunaire du *sparnacien*.

Le type du sparnacien est l'*argile plastique* de la région parisienne, tantôt franchement d'eau douce, avec physes et paludines, tantôt saumâtre avec cyrènes (*Cyrena cuneiformis*), cérithes, mélanies (*Melania inquinata*), potamides et parfois *Ostrea bellovacina*. Les *lignites pyriteux du Soissonnais* font partie de cette formation, où apparaissent des lentilles de calcaire lacustre ou travertin. Vers le nord, les lits sableux y prédominent (*landénien* supérieur de la Belgique). Cet ensemble est représenté dans le bassin de Londres par les couches à galets de Woolwich et d'Oldhaven. Dans le nord, vers son sommet, le sparnacien s'enrichit en types marins, annonçant le régime qui va prévaloir avec l'étage suivant.

Le poudingue à gros galets de silex de Nemours, et les

argiles bariolées de Montereau, sont une forme du sparnacien lacustre. De même, la fin de l'époque a vu se former, dans les lacs ou les lagunes de la Picardie et de la Normandie, des argiles bariolées et des sables, souvent agglomérés en blocs de grès à pavés, aujourd'hui épars à la base du limon des plateaux. Quelques-uns de ces grès sont assez ferrugineux pour qu'on ait pu les exploiter comme minerais.

Types européens divers du landénien. — Le landénien est marin dans le golfe de l'Aquitaine, où il est représenté par les calcaires à miliolites qui surmontent les couches à *Micraster tercensis*. Mais le régime marin, venant de l'ouest, s'affaiblissait progressivement du côté du Languedoc. Dès l'Ariège, des bancs lacustres à *Physa prisca* s'intercalent dans les calcaires à miliolites, et, si l'on revoit près de Narbonne, dans les calcaires à physes, un horizon saumâtre à mélaniens, tout redevient lacustre dans le Bas-Languedoc comme en Provence.

Dans ces mêmes contrées, l'influence saumâtre a persisté pendant le sparnacien jusqu'à la Montagne Noire. Au delà, des calcaires à physes columnaires, comme celui de Langesse, succèdent aux assises à *Physa prisca*, associées à des argiles rouges (Vitrolles).

Le facies marin du landénien reparaît dans le Frioul et le Bellunais, sous la forme de calcaires à miliolites, auxquels se mélangent dans le haut des formations d'eau saumâtre.

Le landénien en Afrique, Asie, Amérique. — Le landénien est mal défini en Algérie et au Maroc, où l'éocène inférieur offre un facies assez uniforme de calcaires à silex. On doit lui attribuer la partie inférieure du *libyen*, ainsi nommé du désert de Lybie, avec *Numm. Rollandi*, auquel correspond le calcaire à échinides et à *Cardita* d'Assouan (Égypte). On retrouve la formation dans le Baloutchistan, le Sind et l'Assam, où le néocrétacique supporte sans discordance des couches à alvéolines, assilines et nummulites. Il n'est donc pas douteux qu'une Méditerranée assez largement ouverte ne continuât à se poursuivre, empiétant à la fois sur l'Europe et l'Afrique, jusque dans le Sud de l'Asie où, passant au nord de l'Hindoustan proprement dit, elle allait rejoindre le Paçifique.

Il n'y a pas de traces du thanétien marin dans l'Amérique du nord, sinon peut-être au New-Jersey. Dans les montagnes Rocheuses, des couches lacustres à coquilles du genre *Unio* succèdent graduellement aux assises daniennes de Laramie; et la base de l'éocène est également représentée au Nouveau-Mexique par les dépôts dits de *Puerco*, avec restes de mammifères très analogues à ceux de la faune cernaysienne; tandis qu'au *Wasatch*, la série de ce nom contient des pachydermes, tels que *Coryphodon*, qui la classent dans le sparnacien. C'est là que se rencontre le plus ancien des équidés, *Heptodon* ou *Eohippus*.

§ 4.

SÉRIE ÉOCÈNE
2° ÉTAGE YPRÉSIEN

Données générales sur l'yprésien. — L'yprésien est, pour l'Europe, une époque d'invasion marine, bien marquée dans le bassin anglo-parisien, où la mer s'avance jusque tout près de Paris, et aussi dans le golfe de l'Aquitaine, où les dépôts de cet âge viennent s'appliquer directement sur la craie de Royan.

Ce qui rend cette invasion marine particulièrement intéressante, c'est qu'elle détermine l'arrivée, jusque dans le domaine de la mer du Nord, des *nummulites*, antérieurement cantonnées dans les régions méditerranéennes. Ce n'est que par l'Atlantique, en contournant le massif espagnol, que cette communication a pu s'établir. Les nummulites deviennent assez abondantes au Soissonnais pour que les sables qui les renferment aient été qualifiés de *sables nummulitiques*. Le groupe des *Nummulites planulatus* et *N. elegans* est caractéristique de l'étage.

C'est aussi à la même époque que paraît se rétablir, en bordure des îles qui jalonnent la future chaîne des Alpes, un synclinal semi-circulaire où pénètre la mer nummulitique. Sur la terre ferme, avec *Lophiodon*, on voit apparaître *Hyracotherium* et *Pachynolophus*, précurseurs des équidés.

Types divers de l'yprésien. — Les *sables du Soissonnais*, si riches en fossiles à Cuise-la-Motte et à Pierrefonds, offrent le type de l'yprésien dans le bassin de Paris. Du même âge sont les sables de Mons-en-Pévèle, reposant sur l'*argile d'Ypres*, laquelle, synchronique de l'*argile de Londres*, peut être regardée comme une assise de passage entre le sparnacien et l'yprésien. Une circonstance intéressante est la présence, dans ce *London clay*, de restes appartenant à des végétaux d'affinités subtropicales, tels que les *Nipadites*, fruits analogues aux noix de coco.

Aux environs de Royan et près de Blaye, à Saint-Palais, on constate la superposition directe à la craie de sables gréseux à *Nummulites planulatus*, que les sondages retrouvent près de Bordeaux et jusque dans le Gers.

Ce golfe yprésien de l'Aquitaine, accidenté de quelques îles, couvrait la Chalosse de couches à alvéolines et à nummulites. La mer s'est avancée sur le nord des Corbières et a presque atteint Saint-Chinian, où le golfe se fermait, le Languedoc et toute la Provence continuant à subir le régime continental.

Au contraire, de l'autre côté d'un éperon pyrénéen venant de l'ouest et s'avançant jusqu'aux sources de l'Adour, la mer couvrait la Catalogne et le nord de l'Espagne. Elle déposait sur l'Apennin des schistes argileux versicolores et des jaspes avec nummulites et alvéolines; et un de ses bras pénétrait jusqu'aux Alpes vénitiennes, où il a laissé comme traces les calcaires à nummulites de Spilecco.

Dans le sud, la mer à *Nummulites planulatus* s'étendait sur le Tell algérien, les hauts plateaux de Constantine, la Libye et l'Égypte septentrionale. On en retrouve les traces au Baloutchistan, à Catch, dans le Sind et même en Birmanie.

Une bande de dépôts marins, qui paraissent synchroniques de l'yprésien, accompagne, depuis le New-Jersey jusqu'au Texas, le bord atlantique des États-Unis. Mais, dans les Montagnes Rocheuses, l'étage n'est représenté que par des dépôts d'eau douce, où apparaissent les mammifères *Hyrachyus* et *Pachynolophus*, ce dernier allié aux équidés.

§ 5

SÉRIE ÉOCÈNE
3° ÉTAGE LUTÉTIEN

Données générales sur le lutétien. — L'époque lutétienne a vu d'abord l'apogée, puis le déclin de la conquête opérée par la mer éocène sur le bassin anglo-parisien. Au début, la submersion dépasse notablement au sud la latitude de Paris, en même temps qu'elle atteint le bord du Cotentin et l'embouchure de la Loire (fig. 136). Les calcaires à nummulites s'installent en plein cœur du Soissonnais. Dans le midi, une large bande est inondée entre l'Atlantique et la Montagne Noire, et le synclinal extérieur aux Alpes permet aux calcaires nummulitiques de se poursuivre depuis la Méditerranée jusqu'au delà des Carpathes.

Mais, à la fin, tout le bassin de Paris a fait place à des lagunes ou à des lacs d'eau douce, tandis que, dans la région pyrénéenne, à l'exception de la fosse de l'Adour, des formations lacustres annoncent une émersion qui n'est autre que le prélude du soulèvement des Pyrénées.

Le couple de *Nummulites lævigatus* et *N. Lamarcki* est, dans le nord et l'ouest, avec *Assilina granulosa*, caractéristique du lutétien inférieur. Dans les Alpes, les formes habituellement désignées sous les noms de *N. complanatus* et *N. perforatus* se montrent surtout au sommet de l'étage. Là où la formation est d'eau douce, on constate l'association de *Lophiodon* avec les précurseurs des pachydermes de l'éocène supérieur et de l'oligocène, tels que *Paloplotherium*.

Bassin de Paris. — Le bassin de Paris a fourni dans le *calcaire grossier*, si fort employé pour les constructions de la capitale, le type du lutétien. Dans le centre du bassin, au Soissonnais, la base de l'étage est un calcaire à nummulites (pierre à liards). Mais, plus au sud, la transgression qui amène les dépôts lutétiens à reposer directement sur le sparnacien se traduit d'ordinaire par un gravier glauconieux à échantillons roulés de *Numm. lævigatus*.

A ce gravier succède une assise, souvent glauconieuse, et très fossilifère à Grignon ; c'est la zone à *Cerithium giganteum*. Elle marque un progrès dans la clarification des eaux, qui bientôt, devenues propres au développement des foraminifères et des petites algues calcaires, déposent le calcaire grossier à miliolites (pierre tendre ou *vergelé* de Chantilly). C'est alors qu'un changement de régime est annoncé par l'apparition d'un banc saumâtre ou lacustre, à *Potamides lapidum*, avec empreintes végétales où l'on reconnaît des palmiers-éventails et d'autres plantes de type africain.

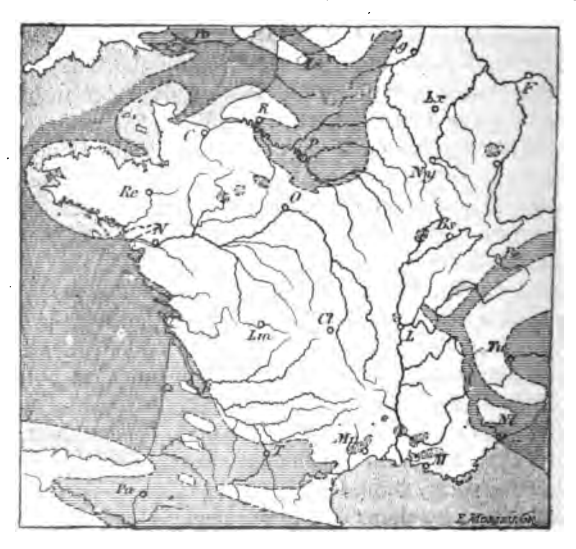


Fig. 136. — La France à l'époque lutétienne.

Mais un retour des eaux marines provoque la formation de couches saumâtres à nombreux cérithes ou potamides et turritelles (*Turritella fasciata*). Ces couches, ultérieurement durcies, fournissent les *bancs de roche*, autrefois exploités dans les catacombes parisiennes, et auxquels succèdent les *caillasses* du lutétien supérieur. Dans ces caillasses apparaissent, tantôt des

lits d'eau douce, tantôt des intercalations gypseuses, attestant l'évaporation qui se faisait dans les lagunes parisiennes.

France occidentale et méridionale. Région alpine. — Très fossilifère et riche en gastropodes au Cotentin (Valognes) comme près de l'embouchure de la Loire, autour de Saffré, le lutétien change de caractères dans la Chalosse, où, devenu un calcaire ou un grès calcaire, il abonde en nummulites, assilines, operculines, orbitolites et alvéolines. On le retrouve, représenté par son sommet, à la base des couches de Biarritz, puis au sommet du Mont Perdu. Seulement, à partir des Pyrénées centrales, les couches marines à operculines supportent un calcaire qui contient le gastropode d'eau douce *Planorbis pseudo-ammonius*, et constitue dans le midi la forme lacustre du lutétien supérieur. Ce calcaire s'intercale au milieu de poudingues spéciaux à la région, témoignage du mouvement qui allait dresser dans les airs la chaîne des Pyrénées. Le grès de Carcassonne est une *mollasse* contemporaine de ces poudingues lutétiens.

C'est seulement sous la forme de calcaires lacustres, offrant toujours en haut *Planorbis pseudo-ammonius*, que le lutétien se présente dans le Languedoc, en Provence et dans la dépression du Rhône. Au contraire, dans le synclinal alpin, à partir de Nice, on retrouve, en transgression manifeste, les calcaires à nummulites, qui se continuent par la Suisse jusque dans les Alpes bavaroises, pour faire place ensuite à du grès, la partie lutétienne du *grès de Vienne*, à nummulites et assilines.

Régions diverses. — La mer nummulitique passait en Belgique, où elle a laissé les dépôts dits *bruxelliens* et *laekéniens*. Elle couvrait largement la région hongroise et l'Italie (fig. 137). Elle submergeait l'Algérie, la Tunisie, où les phosphates de Gafsa paraissent se rapporter à ce niveau, puis le désert libyque (parfois jonché de grandes nummulites, *N. Gizehensis*); et tandis que d'un côté, par l'Égypte et le pays des Somalis, elle rejoignait Madagascar, de l'autre par Rhodes, l'Asie mineure, la Perse et le Baloutchistan, elle atteignait le Sind et l'Himalaya. L'éocène à nummulites se retrouve encore à Sumatra, à Java, à Bornéo, à Manille. Ainsi, à l'époque luté-

tienne, une large dépression se poursuivait du Maroc au Pacifique, procurant à l'Europe, avec une température exceptionnellement élevée, un climat qui s'est traduit par l'aspect africain de la flore.



Fig. 137. — L'Europe à l'époque lutétienne.

En Amérique, la mer continuait à ne se montrer que sur le bord atlantique des États-Unis.

§ 6

SÉRIE ÉOCÈNE
4° ÉTAGE BARTONIEN

Données générales sur le bartonien. — Avec le bartonien, un retour offensif de la mer sur le bassin de Paris, dans des limites peu différentes de celles du lutétien, se traduit par un épisode de sédimentation plus troublée, sableuse en France,

argileuse en Angleterre (notamment à Barton). Cependant le régime marin n'est pas tellement franc qu'il ne soit, à plus d'une reprise, accidenté par des retours de l'élément lacustre.

C'est dans le midi que cet élément se prononce, le soulèvement des Pyrénées ayant fermé définitivement le détroit languedocien. Mais, dans la fosse de l'Adour comme dans le synclinal alpin, les couches marines du bartonien succèdent sans interruption à celles de l'étage précédent, à tel point qu'il est malaisé d'établir avec précision leur limite commune.

Dans le nord, *Nummulites variolarius* (avec *N. Heberti*) est l'espèce caractéristique du bartonien inférieur, tandis qu'en haut se montre *N. wemmelensis*.

Dans les pays méditerranéens domine le couple formé par *N. contortus* — *N. striatus*. Les *Orthophragmina* persistent, avec prédominance des formes minces. Les formations lacustres de l'âge offrent l'association de *Lophiodon* avec *Palæotherium*.

Types divers du bartonien. — Le bartonien de la région parisienne a été longtemps désigné sous le nom d'assise des *sables de Beauchamp* ou *sables moyens*[1]. Ces sables, en plus d'un point, sont remarquablement fossilifères et riches en cérithes, tels que *Cerithium* (*Potamides*) *tricarinatum*, *C. mutabile*, etc. Plusieurs calcaires lacustres s'y intercalent; le plus connu est le *calcaire de Saint-Ouen*, à *Planorbis goniobasis* et *Limnæa longiscata*. La formation se termine par l'épisode marin des sables de Cresne et des marnes à *Pholadomya ludensis*, avec lesquelles commence le régime des dépôts de gypse.

En Angleterre, à Barton, l'argile à fossiles marins contient aussi des restes de végétaux, lauriers, figuiers, palmiers, qui attestent que, jusqu'à cette latitude, le climat demeurait très chaud.

Les symptômes d'émersion à la fin du bartonien se reproduisent dans le Médoc. Mais il n'en est plus ainsi à Biarritz, où les marnes bleues de la côte des Basques, à *Serpula*

1. Le nom de *sables inférieurs* était appliqué aux sables nummulitiques du Soissonnais, et celui de *sables supérieurs* à la formation oligocène de Fontainebleau.

spirulæa, pentacrines et nummulites, ménagent une transition progressive du lutétien à l'oligocène.

C'est au bartonien que revient la majeure partie du *poudingue de Palassou*, formation d'origine torrentielle, qui s'est constituée lors de la surrection des Pyrénées, comme une sorte de cuirasse au pied de la chaîne, et qu'on peut suivre jusque dans le Tarn, dessinant le rivage contre lequel les galets pyrénéens s'accumulaient, refoulés au nord à mesure que se soulevait l'isthme languedocien. Ce conglomérat passe latéralement à la *mollasse du Castrais*, avec *Lophiodon* et *Palæotherium*.

Il faut aller jusqu'à Nice pour retrouver le bartonien marin. On le suit alors, dans le synclinal alpin, à Faudon, aux Diablerets, à Interlaken, enfin jusque dans les Carpathes. Mais, au Vicentin, l'étage, tout en demeurant nummulitique, revêt parfois la forme d'une brèche à éléments basaltiques, qui prouve qu'à cette époque la région extérieure aux Alpes était le siège d'une notable activité éruptive. Il convient de lui attribuer les marnes de Priabona, équivalent de celles de Biarritz.

Sans doute le bartonien existe en Algérie, en Libye et dans l'Inde; mais la place qui lui revient dans les sables et calcaires nummulitiques de ces régions demanderait à être fixée avec plus de précision qu'on ne peut le faire aujourd'hui.

§ 7

GÉNÉRALITÉS SUR LA SÉRIE OLIGOCÈNE

Traits généraux de la période oligocène. — La période oligocène est encadrée entre le principal soulèvement des Pyrénées et les changements géographiques qui ont inauguré la surrection définitive de la grande chaîne alpine. Ses débuts sont marqués, dans les latitudes tempérées froides, par une invasion marine venant du nord, qui découpe l'Europe en golfes profonds. Cette invasion se fait sentir, en France jusque dans le Gâtinais et même en Limagne, dans la vallée du Rhin jusqu'à Bâle, tandis que dans les régions méridio-

nales, le domaine maritime semble plutôt reculer vers le sud. En Russie, une mer dont le rivage nord court de la Baltique à Kiew, contourne l'Oural à l'est et va rejoindre la zone arctique. Sous l'influence de cette mer septentrionale, le climat européen devient plus tempéré et moins extrême. Les types végétaux africains et austro-indiens commencent à rétrograder, pendant que les nappes lacustres de l'éocène supérieur gagnent en étendue.

Ce qui caractérise les mammifères oligocènes, c'est la coexistence du pachyderme *Palæotherium* avec le ruminant *Anthracotherium*. Les ruminants de la période sont dépourvus de cornes et les proboscidiens n'ont point encore paru en Europe. Parmi les mammifères nageurs, les *siréniens* tels qu'*Halitherium* sont nombreux. En outre, les dents de squales abondent dans les dépôts littoraux, et le genre *Potamides* se développe près des estuaires.

La flore oligocène étale une incomparable richesse, associant, sur l'emplacement actuel du lac de Genève, les palmiers aux lauriers, aux figuiers, aux camphriers, aux cannelliers, aux chênes, aux acacias et aux érables.

Ajoutons que c'est probablement à l'époque oligocène qu'a eu lieu la fermeture définitive du bras de mer qui, pendant si longtemps, avait permis à la Méditerranée européenne de communiquer par la région himalayenne avec le Pacifique.

Divisions de la série. — Des deux étages de la série *oligocène*, le premier ou *tongrien* (de Tongres en Limbourg), dit aussi *sannoisien* de (Sannois près Paris), correspond à l'invasion marine qui s'est fait sentir sur toute l'Europe septentrionale. Sans doute, cette invasion a été le contre-coup du soulèvement pyrénéen et de l'émersion provoquée par cet événement dans les contrées méridionales, où seuls le golfe de l'Aquitaine et quelques points de la Provence laissent apercevoir des dépôts marins de cet âge.

Le second étage ou *stampien* marque, dans le nord, un progrès de la mer qui la fait avancer, vers le sud, plus loin que jamais, tandis qu'à ce même moment toute l'Aquitaine paraît émergée.

On distinguait autrefois dans l'oligocène un étage supérieur

ou *aquitanien*. Mais la plupart des géologues s'accordent aujourd'hui pour l'attribuer au système néogène.

Palæotherium et *Anoplotherium* sont les mammifères caractéristiques de l'oligocène inférieur. Ils disparaissent dans le stampien, où domine *Anthracotherium*.

Parmi les foraminifères, les nummulites deviennent très petites. Le couple *Nummulites intermedius-Fichteli* caractérise l'oligocène inférieur, tandis que *N. Bezançoni* occupe le stampien. Le genre *Orthophragmina* a disparu, et les orbitoïdes ne fréquentent plus l'Europe, ne se montrant que dans la zone subtropicale, sous la forme de *Lepidocyclina*.

§ 8

OLIGOCÈNE INFÉRIEUR

Nord de l'Europe. — L'invasion marine oligocène est bien marquée dans le nord de l'Allemagne, où elle s'est traduite par le dépôt des sables glauconieux de Latdorf à *Ostrea ventilabrum*. Dans le Samland, ces sables sont riches en nodules d'ambre, où abondent les insectes, et qui ont été sécrétés par le *Pinus succinifer*. La mer s'avançait jusqu'à Leipzig et à Halle-sur-Saale, où le fond des golfes s'est tapissé de lignites.

A la même assise appartiennent les sables tongriens du Limbourg belge, notamment ceux de Grimmertingen et de Neerrepen, avec *Numm. Boucheri*. Mais cette incursion marine s'est terminée par l'épisode saumâtre des glaises vertes de Henis.

Le régime marin était encore moins franc dans le sud de l'Angleterre, au Hampshire, où des couches d'eau douce à *Palæotherium* alternent avec les lits saumâtres de la série de Headon, surmontés par l'assise mi-partie lacustre et mi-partie saumâtre de Bembridge.

Bassin de Paris. — La même indécision de régime se reproduit dans le bassin de Paris. Des lagunes, qui s'avancent assez loin vers le sud, y sont le siège d'une active évaporation, donnant lieu au dépôt des masses supérieures du *gypse* parisien, formation dont les débuts avaient eu lieu lors du barto-

tien supérieur. Tandis que les cours d'eau amenaient dans les lagunes des ossements de *Palæotherium* et autres mammifères, des incursions marines momentanées s'y traduisaient par le dépôt de minces couches de marnes à lucines et à cérithes. D'autre part, à Champigny comme dans le Tardenois, à la hauteur du gypse supérieur se formait un travertin, souvent bréchiforme et imprégné de calcédoine.

Le régime d'eau douce a un moment triomphé avec les marnes blanches supragypseuses de Pantin, à limnées et ossements de *Xiphodon*. Mais, outre que la base de ces marnes renferme un crustacé de marais-salants, *Sphæroma margarum*, le retour des lagunes saumâtres s'annonce par-dessus avec les *glaises à cyrènes*, qui débordent au sud les marnes du gypse, et sont couronnées par une assise très constante de *glaises vertes*. Il est vrai que l'eau douce reprend un instant le dessus, faisant naître au sud de Paris le grand lac de la Brie. Là se déposent, avec des marnes, des calcaires siliceux et des meulières (*meulières de Brie*), des travertins compacts, comme le beau calcaire de Château-Landon et de Souppes, auquel se rattachent les travertins de Briare et de Cosne, sur la Loire. L'influence saumâtre persiste dans le nord, se révélant à Sannois, près de Paris, par une couche à cérithes.

Gisements français divers. — Dans l'ouest de la France s'observent quelques lambeaux saumâtres d'oligocène inférieur. La formation ne devient franchement marine que sous la forme du *calcaire grossier de Rennes*, relié au bassin de l'Aquitaine où se produisait, à cette époque, une lutte entre le régime continental et le régime marin; le premier affirmé par des mollasses à *Palæotherium* du Fronsadais, les gypses de Sainte-Sabine, les calcaires lacustres de Fumel et de Beaumont-de-Périgord; le second accusé par le calcaire à oursins de Saint-Estèphe, les marnes à anomies du Médoc, enfin le *calcaire à astéries* du Bordelais, qui termine l'étage. On trouve dans ce calcaire, avec des articles d'étoiles de mer, *Natica angustata*, *Turbo Parkinsoni*, etc. Cet horizon se revoit en Chalosse, dans les marnes de Gaas.

A Biarritz, tout l'oligocène inférieur est marin, embrassant les couches à *Euspatangus ornatus* qui forment les falaises du

Port vieux jusqu'au phare, et se montrent riches en petites nummulites, *N. intermedius-Fichteli*, *N. vascus*, *N. Bouillei*.

Dans la plus grande partie du Languedoc et de la région sous-pyrénéenne, il n'y a à ce niveau que des formations d'eau douce; mais le gypse reparaît à Mas Saintes-Puelles, près de Castelnaudary, et aussi dans le bassin d'Alais, où une couche saumâtre à *Melanoides* et *Striatella* semble indiquer, par ses fossiles, qu'il y avait alors communication entre les lagunes du Gard et celles du Plateau Central.

La dépression rhodanienne accuse un progrès des eaux lagunaires dans le bassin d'Aix, à la place des anciens lacs éocènes. Le gypse s'y montre près d'Apt, ainsi que des lignites renfermant les mammifères caractéristiques de l'époque.

Au même moment se formaient en Limagne des grès et arkoses avec cyrènes, *Palæotherium* et striatelles, ainsi que des calcaires à potamides. Les marnes à mammifères de Ronzon (Velay) appartiennent à cet horizon.

Dépôts sidérolithiques. — C'est à l'oligocène et principalement à sa partie inférieure, que doivent être attribués la plupart des dépôts de *minerais de fer en grains* et de calcaire, parfois entremêlés de gypse, qui constituent le *terrain sidérolithique* du Jura, du Berry, du Poitou, etc. Ce sont des dépôts de sources, dont l'âge est souvent fixé avec certitude par leur position au-dessous d'un travertin identique avec celui de la Brie (Saint-Florent et la Chapelle, près de Bourges).

On y doit rattacher aussi les gisements de *phosphorite* ou phosphate de chaux concrétionné du Quercy, qui occupent, dans les calcaires jurassiques sous-jacents, des poches et des fentes souvent riches en ossements, où les genres *Palæotherium* et *Anthracotherium* se montrent associés.

Flysch alpin. — La plus grande partie du *flysch* de la région subalpine et de la Suisse appartient à l'oligocène inférieur, ainsi que le prouve la fréquente intercalation dans sa masse de lits à petites nummulites (*N. intermedius-Fichteli*), comme à Allons, Annot et le Dévoluy.

Le flysch typique est un ensemble de schistes marneux et de grès schisteux, avec empreintes rapportées à des algues

(*Chondrites*) et quelquefois écailles de poissons. Les grès de Menton et ceux d'Annot en font partie. Ces grès sont souvent mouchetés, comme le *grès de Taveyannaz* des Diablerets, qui se suit de Grenoble au Sentis. Dans la région du Léman, la partie supérieure du flysch est rouge. Cet ensemble détritique paraît devoir être considéré comme le produit de la destruction progressive d'un premier relief alpin, qui tendait à se dessiner.

Le flysch se retrouve dans les Carpathes, où une assise à empreintes problématiques porte le nom de flysch à *hiéroglyphes*, tandis qu'une autre constitue les *schistes à ménilite*. Des couches à petites nummulites y apparaissent en Moravie et en Hongrie.

Types divers de l'oligocène inférieur. — La mer oligocène a couvert le sud de la Russie, jusqu'à Simbirsk et Riga, par des sables glauconieux, suite de ceux de l'Allemagne du nord et du Limbourg. Cette mer couvrait la dépression aralo-caspienne et le flanc oriental de l'Oural.

On retrouve en Arménie, en Perse et dans le Sind indien des couches contemporaines de celles des assises supérieures de Biarritz, et l'étage existe aussi à Java et à Bornéo. On le revoit en Algérie dans les grès de Numidie, et en Égypte, où la mer s'arrêtait alors au Fayoum, laissant se former en ce point des dépôts d'eau douce avec de curieux mammifères, précurseurs des proboscidiens du miocène.

Dans la région de la Floride et des Antilles, l'oligocène, à l'état calcaire, se signale par la présence des foraminifères du genre *Lepidocyclina*. Ainsi les orbitoïdes, qui font défaut en Europe dans l'oligocène inférieur, prospéraient alors dans la zone voisine des tropiques. Tel est probablement aussi l'âge des couches à *Pyrotherium* de la Patagonie, avec leurs mammifères si différents de ceux de l'Europe et de l'Amérique du nord, comme s'ils étaient originaires d'une ancienne terre antarctique.

§ 9

OLIGOCÈNE SUPÉRIEUR

Nord de l'Europe. — Les dépôts marins de l'oligocène

supérieur couvrent une grande partie de l'Allemagne du nord, sous la forme sableuse (sables de Stettin) ou argileuse (argile à concrétions cloisonnées dites *Septaria*, avec *Leda Deshayesi*).

Cette mer s'est avancée, vers le sud, beaucoup plus loin que la précédente. Elle a submergé le bassin de Mayence, où les sables marins et l'argile à septaria sont surmontés de marnes saumâtres à cyrènes. La même chose a eu lieu en Alsace et jusqu'à Bâle. L'invasion y a débuté par la formation de puissants conglomérats.

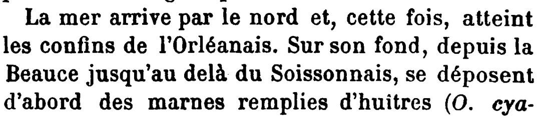
La même invasion déposait au Limbourg belge les sables *rupéliens*, avec argile à *Leda*, sables qui recouvrent la Campine. Elle s'est également fait sentir à l'île de Wight, dans les couches de Hempstead.

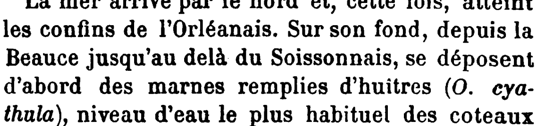


Fig. 138. — *Potamides Lamarcki.*

Quelques-uns des lignites allemands, par exemple ceux du Meissner, paraissent devoir être placés à cette hauteur.

Bassin de Paris. — C'est aussi par une invasion marine bien caractérisée que débute le stampien dans la région parisienne.





La mer arrive par le nord et, cette fois, atteint les confins de l'Orléanais. Sur son fond, depuis la Beauce jusqu'au delà du Soissonnais, se déposent d'abord des marnes remplies d'huitres (*O. cyathula*), niveau d'eau le plus habituel des coteaux de la campagne parisienne, ou des grès marneux fossilifères (Étrechy), gisement de la grande *Natica crassatina.* Une petite nummulite, *N. Bezançoni*, survit dans cette faune. Ensuite viennent les *sables de Fontainebleau*, masse puissante et régulière de sables tantôt blancs, tantôt jaunes, couronnée dans le sud par une couche de grès à pavés, dont les blocs, jonchant les pentes sableuses aux environs d'Étampes et de Fontainebleau, impriment au paysage un aspect particulièrement pittoresque.

Mais la mer va quitter définitivement le bassin de Paris. Un moment elle se retire, laissant se former une couche d'eau douce ou saumâtre à *Potamides Lamarcki* (fig. 138). Puis elle revient un instant, déposant la couche marine d'Ormoy, après

laquelle le régime marin fait place à celui du lac de la Beauce, que nous décrirons avec l'aquitanien.

La couche d'Ormoy se retrouve à l'état siliceux à Sannois. Les sables stampiens se terminent au sud près de Château-Landon.

Types français divers. — L'influence saumâtre persistait en Limagne, où le gypse accompagne à Gannat les calcaires à potamides, bien développés aussi à Issoire et à Aurillac, en compagnie de marnes lacustres à carapaces de *Cypris*.

En Aquitaine, on observe à cette hauteur les mollasses de l'Agenais et du Castrais, offrant l'association de *Paloplotherium* avec *Anthracotherium*. Les mollasses de l'Albigeois sont entremêlées de lits calcaires, tendant à se fondre en une seule masse, celle du calcaire à hélices de Cieurac, Cordes et Briatexte.

Saumâtre à Narbonne, et lacustre dans le Gard, le stampien redevient saumâtre en Provence, où il comprend la série calcaréo-gypseuse d'Aix, avec marnes à nombreux poissons (*Lebias*, *Smerdis*). Les mêmes poissons se retrouvent à Céreste (Basses-Alpes), avec insectes et une riche flore à *Sabal major*.

Types étrangers. — C'est probablement au stampien que doivent être attribués les calcaires à *Natica crassatina* et à polypiers de Castel Gomberto en Vicentin. Cette faune se retrouve en Carinthie et près de Vienne. En Hongrie, près de Gran, des marnes à cyrènes accompagnent des lignites à *Anthracotherium*.

La formation est plus franchement marine en Transylvanie, où les marnes et grès à oursins du genre *Scutella* surmontent les couches à cyrènes, tandis que, tout près de là, des schistes vaseux de mer profonde, avec poissons (*Meletta*) ramènent des circonstances analogues à celles de l'argile à septaria.

Dans la région indienne et indo-chinoise persiste à ce niveau l'association des dernières nummulites avec *Lepidocyclina*, association qui se reproduit en Floride dans le calcaire de Vicksburg, ainsi qu'à Panama.

D'autre part, la faune à polypiers de Castel Gomberto et de l'île de Malte se retrouve aux Antilles, donnant à penser

qu'une chaîne d'îles devait établir une jonction facile entre cet archipel et la Méditerranée européenne.

Dans les Montagnes Rocheuses se sont formés des dépôts d'eau douce (White River) avec les genres *Mesohippus* et *Protoceras.*

CHAPITRE VIII

SYSTÈME NÉOGÈNE

§ 1

SÉRIE MIOCÈNE
GÉNÉRALITÉS

Traits généraux de la période miocène. — La période miocène représente, dans l'histoire de l'Europe, une phase d'une importance exceptionnelle. C'est alors que s'est constitué le massif montagneux des Alpes, avec toutes ses dépendances, et que la Méditerranée a commencé nettement à se morceler.

Au début, de grands lacs prennent possession de l'Europe, aussi bien en Beauce et en Limagne qu'à Manosque en Provence, près de Narbonne en Languedoc, en Savoie, en Suisse, enfin en divers points de l'Allemagne, de l'Autriche, de l'Italie et de la Grèce. En même temps l'Allemagne voit prédominer les lagunes favorables à la production des lignites. L'extension des lacs et l'abondance des dépôts d'eau douce, ainsi que l'opulence des formes végétales, attestent l'humidité croissante du sol, jointe à une chaleur égale et modérée. Les arbres à feuilles caduques prennent visiblement leur essor dans cette seconde phase, sans toutefois exclure les palmiers, qui prospèrent encore au delà du 50e parallèle, ni les camphriers, dont la limite boréale dépasse le 55e degré. L'uniformité des

conditions climatériques est attestée par la similitude des flores recueillies, soit sur la Baltique, par 54° de latitude nord, soit en Eubée, par 38°.

Bientôt les grands lacs se vident et les vallées fluviales se dessinent. Le relief devient plus accentué, et la mer de la mollasse envahit une notable partie de l'Europe, en même temps qu'elle se répand sur l'Asie Mineure orientale jusqu'à l'Euphrate et au lac Ourmia. Par cette mer, l'Europe est découpée en une sorte d'archipel indien, où les conditions deviennent éminemment propres à l'épanouissement du monde végétal. Aussi ce dernier, dans son ensemble, ne s'est-il jamais montré plus opulent. L'hiver est encore particulièrement doux, ne suspendant jamais d'une manière complète l'activité de la végétation et, quand la période s'achève, le camphrier garde le privilège de fleurir, dès le mois de mars, sur l'emplacement du lac de Constance, comme il fait de nos jours à Madère. Pour retrouver les associations végétales de la période miocène, il faudrait aujourd'hui descendre de 25 à 30 degrés vers le sud.

Après cette transgression marine, la grande chaîne des Alpes se dresse dans les airs et la mer cesse de passer en Suisse. De plus, des courants venus du nord, sans doute à la faveur d'une brèche ouverte dans les terres qui jusqu'alors avaient barré l'Atlantique, amènent dans une partie des mers méditerranéennes une faune offrant des affinités septentrionales. Ensuite un dernier plissement achève de façonner les Alpes. La Méditerranée s'isole presque complètement, par suite de la fermeture du détroit qui, entre le plateau central de l'Espagne et la Cordillère bétique, avait antérieurement assuré sa communication avec l'Océan. Alors toute sa partie orientale se transforme en une série de cuvettes saumâtres, autour desquelles évoluent les herbivores. En dernier lieu, il se constitue, de la Sardaigne au centre de l'Asie, une grande dépression de moins en moins salée, dans laquelle la faune de la Caspienne prend naissance.

C'est durant la période miocène que les mammifères paraissent avoir atteint leur plus haut degré de développement. Les *proboscidiens*, dont aucun symptôme n'avait encore annoncé

la venue en Europe, se manifestent avec le ***mastodonte*** aux dents mamelonnées et le *Dinotherium* aux puissantes défenses. Le *rhinocéros* est devenu le roi des pachydermes et les herbivores tendent à prendre une place prépondérante, grâce à l'abon-



Fig. 139. — *Cerithium (Potamides) margaritaceum.*

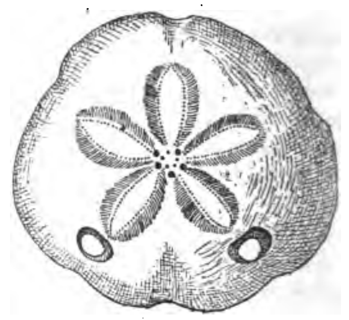


Fig. 140. — *Amphiope perspicillata.*

dante végétation de graminées que leur offrent les plages méridionales. C'est à la fin de la période que d'innombrables

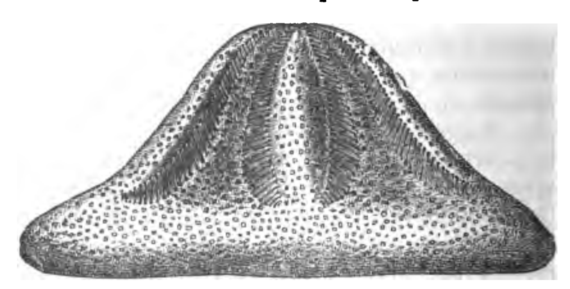


Fig. 141. — *Clypeaster altecostatus.*

troupeaux d'antilopes, de cerfs, de gazelles, parcourent les herbages méditerranéens, en compagnie des *hipparions*, voisins des chevaux.

Les cérithes, ou pour mieux dire, les *potamides* (fig. 139) et

les *Murex* ou rochers sont nombreux dans les dépôts coquilliers de rivage ou *faluns* de la période. Ils s'y montrent fréquemment associés à des cônes, à des cyprées (porcelaines) et à des oursins aplatis tels que *Scutella*, *Amphiope* (fig. 140), ou renflés comme *Clypeaster* (fig. 141).

La flore miocène accuse, en Europe, une température égale, clémente durant l'hiver, pluvieuse pendant l'été. Le refroidissement de la zone tempérée ne se manifeste que par la marche envahissante des arbres à feuilles caduques, notamment des peupliers et des érables, et par la rareté plus grande des palmiers européens. Mais la proportion réellement considérable des plantes à feuilles persistantes fait voir que la nature végétale ne traversait pas, dans nos latitudes, de phases de repos complet.

Divisions de la série miocène. — Le premier étage de la série miocène est l'*aquitanien*, qui voit la réapparition en Europe des orbitoïdes (*Lepidocyclina*). Ensuite vient le *burdigalien* (ancien *langhien*), qui fait succéder, dans le Bordelais, des couches franchement marines aux formations d'eau douce qui avaient terminé l'aquitanien de la contrée. Le foraminifère *Miogypsina* domine à ce niveau.

Mais c'est surtout dans le bassin du Rhône que la transgression marine est marquée. Dans cette dépression, émergée depuis la fin des temps crétaciques, la mer pénètre en un long golfe, qui se prolonge par un bras étroit à travers la Suisse et va rejoindre le bassin de Vienne, tandis que l'ancien synclinal nummulitique subalpin est désormais fermé. Au régime du flysch succède maintenant celui des *mollasses* ou grès tendres, accompagnées de poudingues, témoignage du mouvement qui prépare la surrection des Alpes, détruites à mesure qu'elles se dressent. Un peigne, *Pecten præscabriusculus*, est le fossile caractéristique des mollasses burdigaliennes.

Un mouvement plus accentué du sol de l'Europe détermine alors l'arrivée de la mer jusqu'aux portes de Blois, pendant que la submersion de la Suisse fait des progrès. Aussi cette nouvelle époque avait-elle été appelée *helvétienne*, le nom de *tortonien* (des marnes de Tortone en Italie) étant réservé à

l'époque suivante, comprise avec la première et avec le burdigalien dans le *falunien* de d'Orbigny. Mais on a reconnu depuis que, le plus souvent, ce qu'on a appelé tortonien n'est qu'un facies de l'helvétien. Il paraît donc plus convenable de les réunir en un seul étage, qui par son développement aux environs de Vienne (Autriche) a mérité le nom de *vindobonien*. Les *Pecten rotundatus*, *P. scabriusculus*, *P. Gentoni*, *Ostrea crassissima* et *Cardita Jouanneti* y sont fréquents.

A la fin du vindobonien, les Alpes ont acquis leur principal relief. La mer abandonne la France et la Suisse. Mais il subsiste, dans l'Europe orientale, de grandes lagunes saumâtres, dont les dépôts forment l'étage *sarmatien*. Puis ces dépressions se dessalent de plus en plus, et la faune de la Caspienne prend naissance avec le nouvel étage *pontien*, représenté en plusieurs pays par des limons à ossements d'herbivores, où domine *Hipparion*, tandis que le proboscidien *Mastodon* prospérait dans le vindobonien, ayant apparu dès le burdigalien avec *Dinotherium*.

§ 2

SÉRIE MIOCÈNE
1° ÉTAGE AQUITANIEN

Nord de l'Europe. Bassin de Paris. — A l'époque aquitanienne, le régime marin avait quitté l'Allemagne du nord, où se déposait la plus grande partie de la *formation lignitifère*, ensemble de sables quartzeux à galets roulés et d'argiles avec lignites, formés surtout de débris de conifères et de cupressinées. Quelquefois ces lignites alternent avec des tufs basaltiques, qui marquent la reprise de l'activité volcanique en Europe, après une très longue interruption.

Représenté peut-être en Belgique par la partie inférieure des sables du Bolderberg (*boldérien*), l'aquitanien est d'eau douce ou saumâtre dans le bassin de Mayence, où le *calcaire à colimaçons* alterne avec des couches à cyrènes et d'autres à cérithes. On en retrouve l'équivalent en Alsace.

Le lac de la Beauce, inauguré à la fin du stampien par la

couche à potamides et cyclostomes d'Ormoy, s'est tapissé de calcaires lacustres ou travertins, dit *travertin supérieur* ou *calcaire de la Beauce*. Une assise inférieure (*calcaire du Gâtinais*) est riche en limnées. C'est celle qui, devenue siliceuse aux environs de Paris, fournit les *meulières de Montmorency* et d'Epernon, à *Limnæa cylindrica* et graines de *Chara*. L'assise supérieure, séparée de la précédente par la *mollasse du Gâtinais*, est le *calcaire de l'Orléanais* ou *calcaire à hélices* (*Helix Moroguesi*, *H. Ramondi*). Plusieurs auteurs l'attribuent seule à l'aquitanien, laissant la précédente dans le stampien.

Types français divers. — Dans l'Aquitaine s'est prononcée, avec l'Aquitanien, une invasion marine, assez franche dans le Bordelais, où elle a déposé les *faluns* de Lariey, après la mollasse à *Ostrea aginensis*, moins franche dans le Bazadais, où les grès marins de Bazas sont encadrés entre deux assises de calcaire lacustre, se fondant dans le *calcaire de l'Agenais* à *Helix Ramondi*. Des faluns marins se sont formés à la même époque à l'embouchure de l'Adour et jusqu'au delà de Dax.

L'étage est d'eau douce à Narbonne, où on lui attribue le beau gisement de plantes fossiles d'Armissan. En revanche, la mer empiète un peu sur le rivage de la Provence, à Carry et au cap Couronne, près de Marseille. Mais ailleurs on ne trouve plus que des dépôts d'eau douce à *H. Ramondi*, qu'on suit jusqu'à Dijon et au delà.

En Limagne, il s'est déposé, dans les lacs de Clermont et d'Issoire, une grande épaisseur de bancs calcaires et marneux, dont la base contient *Helix Ramondi*, le sommet étant formé par les *calcaires à phryganes*, associés à des *pépérites* ou tufs basaltiques.

De cet âge est le calcaire de Saint-Gérand-le-Puy (Allier), riche en ossements de *Rhinoceros* et autres mammifères, avec squelettes d'oiseaux.

Types divers de l'aquitanien. — En Suisse se sont formées, durant l'aquitanien, des *mollasses* ou grès tendres, comprenant, à la base, la mollasse rouge de Genève et de Lausanne : au milieu, la mollasse à lignites, avec bancs calcaires à *Helix rugulosa*; au sommet la mollasse à gypse et à néritines, trahissant le retour de conditions saumâtres.

Ce n'est qu'en Bavière que l'aquitanien redevient franchement marin, préparant le type du bassin de Vienne, c'est-à-dire les couches de Horn et de Loibersdorf, ces dernières abondantes en huîtres et en pétoncles.

Une transgression marine aquitanienne s'est fait sentir à Madagascar, à Java, à Bornéo, à Formose. Elle a déposé des couches à lépidocyclines et à *Lithothamnium*, qu'on retrouve aussi aux Antilles, en Floride et à Panama.

§ 3

SÉRIE MIOCÈNE
2° ÉTAGE BURDIGALIEN

Types divers du burdigalien. — Représenté dans le Bordelais par les *faluns* ou riches dépôts coquilliers de Léognan et de Saucats, le burdigalien est d'eau douce dans le bassin de Paris. A cette époque, sur l'emplacement de la partie méridionale du lac de Beauce, un grand cours d'eau, esquisse de la Loire actuelle, a versé d'abord les *sables de l'Orléanais* avec leurs ossements roulés d'herbivores, puis les *sables et argiles de la Sologne*, provenant sans doute de la dégradation des granites du plateau central, et répandus sur de grandes surfaces connues pour leur imperméabilité et leur stérilité.

Le burdigalien marin se montre près de Marseille, puis dans la *mollasse* de Saint-Paul-Trois-Châteaux, à laquelle appartient la pierre blanche de Beaucaire. Les poudingues y apparaissent dans le Dauphiné, préparant les conglomérats ou *nagelfluh* de la Suisse, si développés au Rigi. Près de Lausanne, des couches d'eau douce s'y mélangent, montrant que la communication avec l'est n'était pas encore bien franche. Mais, dans le bassin de Vienne, les couches marines reparaissent, avec les fossiles de Léognan.

A cette époque, le nord de l'Allemagne était transformé en grands estuaires, où se déposaient des lignites, comme ceux de Cologne, tandis que, dans le bassin de Mayence, il se formait des couches à mollusques saumâtres, où les cours d'eau voisins entraînaient des restes de rhinocéros et de tapirs.

Le burdigalien marin, riche en clypéastres, se montre en Catalogne, aux Baléares, en Sardaigne, en Corse, en Ligurie (marnes à ptéropodes des Langhe), au Vicentin, dans les îles Ioniennes, le Tell algérien, le nord de l'Égypte, l'Asie Mineure et la Perse. Enfin on le retrouve en Amérique dans le Maryland, la Géorgie, les Antilles et l'isthme de Panama.

§ 4

SÉRIE MIOCÈNE
3e ÉTAGE VINDOBONIEN

France occidentale. — Le fait capital qui signale l'ouverture de l'époque vindobonienne est l'affaissement survenu en France suivant la basse vallée de la Loire, ce qui permet à la mer de jeter, jusque près de Blois (fig. 142), les riches gisements coquilliers ou *faluns de la Touraine* (Manthelan, Pontlevoy). Ensuite, dans le détroit qui isolait de la Normandie l'île armoricaine, se sont déposés les faluns de l'Anjou et de l'Ille-et-Vilaine, avec grandes dents de squales (*Carcharodon*) et ossements de lamantins (*Halitherium*), ainsi que les faluns du Cotentin.

Dans l'Aquitaine, la mer vindobonienne pénétrait par un golfe assez profond, déposant les faluns de Salles et la mollasse marine de l'Armagnac, puis les faluns argileux de Saubrigues, à gastropodes du genre *Pleurotoma*, logés dans l'ancienne fosse de l'Adour. Mais, sur les bords de ce golfe, des lagunes d'eau douce ou saumâtre recevaient des dépôts calcaires; d'abord, à la base de l'étage, le *calcaire de Sansan*, à *Mastodon angustidens*, puis, plus haut, le *calcaire de Simorre*, à *Mastodon tapiroides*.

Plateau central, bassin du Rhône, Suisse. — C'est à cette époque que se formaient, en Auvergne et au Vivarais, des alluvions fluviatiles, avec éléments volcaniques, où l'on trouve les ossements d'un grand carnassier, le félin *Machairodus cultridens*, avec restes d'*Hipparion*.

Dans le Languedoc, aux environs de Montpellier, la mer

vindobonienne a sensiblement dépassé celle du burdigalien. La transgression est encore plus sensible dans la dépression rhodanienne, où les mollasses de Cabrières, de Cucuron et d'Aix en sont les témoins principaux. La mer a atteint les environs de Pontarlier, recevant sur ses bords des dépôts de poudingues dont les galets sont *impressionnés* par contact

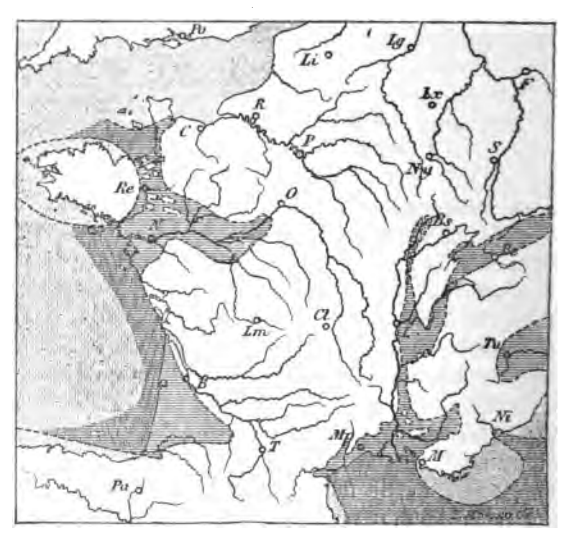


Fig. 142. — La France à l'époque vindobonienne.

mutuel. Puis elle a étendu sur la Suisse d'épaisses nappes de mollasses, comme celle de Saint-Gall, et de *nagelfluh* (lac de Thoune). Mais, avant que l'époque vindobonienne prît fin, le soulèvement définitif des Alpes chassait les eaux marines, ne permettant plus que des dépôts de mollasses d'eau douce. De ce nombre est celle d'Œningen, sur le bord du lac de Constance, célèbre par la richesse en insectes, poissons et plantes terrestres de ses minces plaquettes calcaires, accusant par leurs végétaux un climat analogue à celui de Madère.

Gisements européens divers. — La mer vindobonienne submergeait largement le bassin de Vienne, mais avec tendance à un prochain assèchement, marquée au début par des dépôts de sel et de gypse. Les conditions étaient d'ailleurs très variables. Tantôt des courants froids déposaient des marnes à pleurotomes (Baden), tantôt, sur des plages chau-

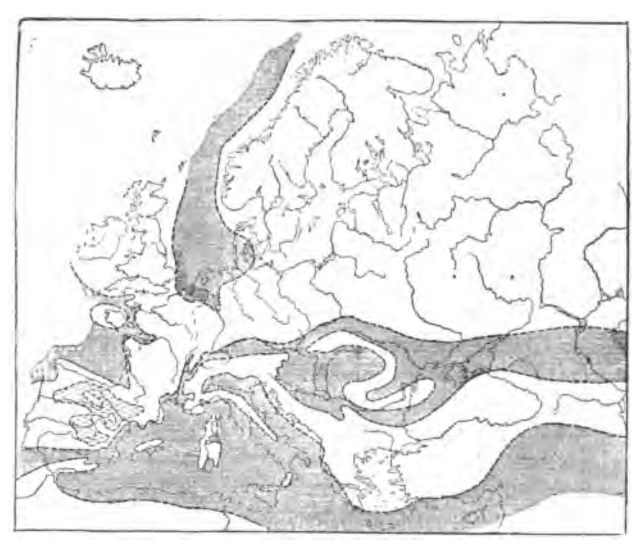


Fig. 143. — L'Europe à l'époque vindobonienne.

des, se formait le *calcaire de la Leitha*, riche en foraminifères (*Heterostegina*) et en algues (*Lithothamnium*).

Pendant ce temps, une mer septentrionale (fig. 143) noyait le Danemark et la Hollande, tapissant son fond d'une argile bleue micacée à pleurotomes et à coquilles du genre *Leda*, et atteignait la Belgique au Bolderberg.

Le conglomérat fossilifère de la Superga, près de Turin, et les marnes bleues à pleurotomes de Tortone, envahies par des formes septentrionales de mollusques, enfin les couches à clypéastres de la Calabre, de Malte et de Corfou, accusent

le passage, en Méditerranée, d'une mer qui se reliait à l'Atlantique par le détroit de l'Andalousie, reconstitué pour la première fois depuis les temps nummulitiques.

Afrique, Asie, Amérique, Régions arctiques. — La mer helvétienne, qui submergeait le Tell algérien et déposait en Égypte les couches à grands clypéastres, s'est étendue sur le sud de l'Asie Mineure et a atteint le nord-ouest de la Perse, où probablement elle se terminait en golfe.

Un fait très intéressant est la présence, aux Antilles, d'un calcaire contenant les mêmes fossiles que le vindobonien de l'île de Malte. Une chaîne d'îles, passant par les Açores, devait assurer la communication de cette région avec la Méditerranée.

Au nord, dans le Nebraska et le Nouveau-Mexique, les mastodontes et le *Machairodus* laissaient, avec des équidés, leurs restes dans des dépôts d'eau douce.

Il convient d'ajouter que des gisements de plantes fossiles, dont les affinités indiquent le miocène supérieur, se rencontrent en Islande, au Groenland, au Spitzberg, et en Nouvelle-Sibérie. Ces restes, où abondent les genres *Populus*, *Sequoia*, *Diospyros*, attestent à quel point le climat des régions arctiques devait différer de ce qu'il est aujourd'hui.

§ 5

SÉRIE MIOCÈNE
4° ÉTAGES SARMATIEN ET PONTIEN

Traits généraux des époques sarmatienne et pontienne. — Avant la fin de l'époque vindobonienne, la mer avait abandonné la vallée du Rhône, ne s'avançant plus que jusqu'au Comtat, et la chaîne des Alpes se dressait à l'endroit où naguère avaient passé les eaux helvétiennes. La Méditerranée, partiellement entraînée dans ce mouvement, ne présentait plus bientôt qu'une série de dépressions saumâtres, et le détroit de l'Andalousie, à peine reconstitué, venait de se fermer.

Ce qui caractérise surtout le début de l'époque succédant

au soulèvement alpin, c'est qu'à la place de l'ancien bassin marin de Vienne en Autriche, il s'est constitué, sur la région autrefois habitée par les Sarmates, une grande dépression, s'étendant à l'est jusqu'au cœur de l'Asie, et où la salure, très variable, tendait à diminuer peu à peu. C'est ainsi qu'aux dépôts *sarmatiens*, dont la base est caractérisée par de petits cérithes (*Cerithium pictum*), ont succédé les dépôts *pontiens*, abritant une faune encore moins marine, qui survit en partie dans la mer Caspienne, et a mérité de s'appeler *aralo-caspienne*. Le genre de mollusque *Congeria* en est plus particulièrement caractéristique, et le même régime s'étendait sur une partie du territoire méditerranéen.

Types divers des étages supérieurs du miocène. — Dans le bassin de Vienne, une première dépression, se produisant au sein des anciens dépôts vindoboniens, détermine la formation des sables à cérithes, surmontés par des marnes marines avec restes de phoques, de dauphins et de baleines, sans aucun élément qui révèle un climat chaud. C'est donc une transformation notable, accomplie depuis le dépôt du calcaire de la Leitha.

Un nouvel affaissement est suivi du dépôt des marnes à congéries et à mélanopsides, avec une faune d'acéphalés qui accuse une dessalure croissante. C'est l'étage pontien, terminé par des graviers terrestres à ossements d'*Hipparion* et de *Mastodon*. Sur le bord méridional des lagunes pontiennes, en Croatie et en Slavonie, les eaux de dessalaient encore plus et il commençait à s'y faire des dépôts dits *levantins*, avec mélange de paludines et de formes saumâtres, telles que les mélanopsides.

Une série de dépressions, aujourd'hui desséchées, permettaient au régime saumâtre de s'étendre, à travers l'Asie centrale, d'un côté jusqu'au sud de la Chine, de l'autre jusqu'au Lac Baïkal, qui abrite quelques survivants de cette faune.

Les lagunes sarmatiennes ont laissé des traces près de Barcelone, en Andalousie, en Ligurie ; et les couches à congéries du pontien, avec gypse et dépôts de soufre, se rencontrent dans le Livournais, la Toscane, la Calabre et la Sicile : de la même façon, les marnes avec gypse de l'Andalousie

trahissent l'émersion qui allait affecter le détroit bétique.

C'est aussi à l'état de couches à congéries que se présente le pontien dans la basse vallée du Rhône, notamment à Bollène (Vaucluse). Mais, non loin de là, dans le mont Luberon l'étage prend la forme de limons rouges, avec nombreux ossements de mammifères, *Machairodus*, *Rhinoceros*, *Hipparion*, *Antilope*, *Helladotherium*; et à ces limons sont associés des cailloutis d'origine alpine, deposés par un cours d'eau précurseur de la Durance. De semblables limons rouges à ossements existent à Pikermi près d'Athènes, et attestent que cette contrée, aujourd'hui aride, était alors occupée par de riches pâturages, offrant une abondante nourriture à de grands troupeaux d'herbivores. Les migrations de ces animaux étaient facilitées par un asséchement partiel de la Méditerranée, où subsistaient de place en place de grandes lagunes salées.

Une formation assez analogue à celle de Pikermi s'est déposée en Inde, dans les monts Siwalik, comme un ruban au pied de l'Himalaya. Les conglomérats y renferment les restes de près d'une centaine de mammifères, dont 11 éléphants et mastodontes.

L'océan Atlantique, dessiné à peu près dans son contour actuel, devait cependant mordre un peu sur les côtes de France, où il aurait laissé, vers la fin de l'époque pontienne, un chapelet de gisements littoraux à *Cardita striatissima*, échelonnés depuis Oléron, par Angers et Rennes, jusqu'au Cotentin (Gourbesville). Au nord, une autre mer jetait sur Anvers les dépôts coquilliers du *crag noir*.

§ 6

SÉRIE PLIOCÈNE

Traits généraux de la période pliocène. — La période pliocène a été inaugurée par un mouvement du sol qui, en faisant écrouler l'axe de la chaîne hispano-africaine récemment soulevée, a créé le détroit de Gibraltar. A ce moment, la Méditerranée s'est vue envahie par une faune d'origine atlantique, ne renfermant plus aucun des types subtropicaux

des époques précédentes. Une série d'effondrements ont créé successivement la fosse tyrrhénienne et une autre s'étendant de la Tunisie aux Cyclades, sans atteindre la mer Égée, tout le bassin oriental de l'Europe continuant à être soumis au régime *aralo-caspien*. Pendant ce temps, le Plateau Central de la France se crevassait, et d'imposantes éruptions volcaniques s'y produisaient.

Bientôt arrive dans la Méditerranée une faune marine franchement boréale, qui prouve que les dernières barrières atlantiques sont définitivement rompues, et la période s'achève sous l'influence d'un refroidissement notable, avec lequel commencent, dans les massifs montagneux, les premières manifestations glaciaires.

La note caractéristique de la faune terrestre pliocène est donnée par les *mastodontes* et les *éléphants*, en même temps que les *rhinocéros* et les *hippopotames* sont à leur apogée, enfin que le genre *cheval* fait son apparition.

Quant à la faune marine, ce n'est que par des nuances, souvent difficiles à saisir, qu'elle se distingue de la faune actuelle.

Divisions de la série. — La série pliocène peut être divisée en trois étages. Celui du bas, ou *plaisancien*, correspond à l'invasion qui, à la suite de la formation du détroit de Gibraltar, a permis aux eaux atlantiques de revenir franchement dans la Méditerranée, pour y amener une faune entièrement dépourvue des types subtropicaux des époques précédentes. C'est alors que se sont déposées les marnes bleues du Plaisantin et celles des environs de Fréjus.

Après le plaisancien, la mer, qui avait réussi à pénétrer par de longues échancrures dans les vallées du Rhône et du Guadalquivir, abandonne ces conquêtes, et un régime fluvial bien accentué s'établit, caractérisé par le dépôt des sables du val d'Arno, ayant pour équivalent marin les sables de l'Astésan (d'où le nom d'*astien*, donné à l'étage).

Alors de nouvelles dislocations se font sentir qui, en Italie, portent parfois les dépôts plaisanciens et astiens de la Calabre à des altitudes comprises entre 800 et 1 200 mètres. Du même coup, une faune franchement boréale envahit la Méditerranée,

qui vient de s'agrandir par une série d'effondrements, et c'est ainsi que des coquilles arctiques parviennent à s'installer dans les parages de la Sicile et de l'île de Rhodes. C'est l'étage *sicilien*, marqué sur le continent par une première invasion des glaciers.

La période s'achève sans que la mer ait encore repris possession des régions situées au delà du Péloponèse, et où la faune aralo-caspienne, issue de la faune pontienne, continue à se développer.

France méridionale et orientale. Suisse. — La mer plaisancienne, en même temps qu'elle déposait, près de Fréjus comme dans le Roussillon et près de Montpellier, des marnes et des sables très fossilifères, remontait la vallée du Rhône jusqu'aux portes de Lyon. Puis le régime saumâtre reprenait le dessus avec des sables et marnes à *Potamides Basteroti*.

La mer se retire (sauf à Cannes et à Montpellier) et il se forme, dans le Valentinois comme dans la Bresse, des marnes lacustres à hélices et paludines (*marnes d'Hauterives*), que couronnent des sables fluviatiles à mastodontes (*Mastodon arvernensis*).

Enfin un mouvement du sol, sans doute celui qui a donné aux Alpes leur dernier relief, imprime aux agents d'érosion une activité particulière. Tandis que de puissants deltas torrentiels, tels que celui du Var, se forment au débouché des cours d'eau violents de la côte ligurienne, la Bresse se couvre de cailloutis ou *alluvions anciennes*, contenant par places de très gros galets de quartzites, originaires comme les autres matériaux de la chaîne alpine qui, après avoir été élevée dans les airs, est en train de se découper en vallées profondes jusqu'au cœur du massif. L'*Elephas meridionalis* a laissé ses débris dans ces alluvions.

Les marnes à paludines se sont étendues dans la vallée de la Saône jusqu'à Auxonne, et les dernières phases du pliocène sont représentées dans la même vallée par des graviers à mastodontes et à éléphants, arrivant jusqu'aux environs de Dijon. Des graviers analogues, plus ou moins entremêlés de dépôts volcaniques et glaciaires, s'observent dans la Limagne, à Perrier, près d'Issoire, où ils sont riches en ossements de

mammifères. Partout donc les vallées actuelles étaient en pleine voie de creusement. C'est en Suisse surtout que s'observent, à la hauteur du pliocène supérieur, des alluvions fluvio-glaciaires, avec cailloux striés, qui correspondent à une première extension des glaces du massif. Ces dépôts constituent ce qu'on appelle le *Deckenschotter* ou encore la *nagelfluh trouée*.

Europe septentrionale. — La mer pliocène empiétait un peu, en Angleterre, sur la côte de Norfolk et de Suffolk, tandis qu'en Belgique elle occupait l'estuaire de l'Escaut. Dans ces deux contrées, elle a formé des dépôts coquilliers connus sous le nom de *crag*. Le *crag corallin* d'Angleterre, abondant en bryozoaires (longtemps confondus avec des corallines ou algues calcaires), représente le plaisancien. Quant à l'astien, il peut réclamer le *crag rouge* d'Angleterre, le *crag fluvio-marin* à mammifères de Norwich et les sables supérieurs d'Anvers, extraordinairement riches en ossements de cétacés.

Enfin, en Angleterre, à la hauteur du sicilien, se présente une couche à débris végétaux, célèbre sous le nom de *forest-bed*, et contenant des restes d'éléphants, de rhinocéros, d'hippopotames, etc., identiques avec ceux du continent. On peut paralléliser cette couche avec les graviers à *Elephas meridionalis* de Saint-Prest, près de Chartres. Bien que la flore du *forest-bed* soit tempérée et composée, en majeure partie, d'espèces qui ont émigré depuis vers le sud, elle atteste qu'à cette époque la végétation anglaise différait sensiblement de celle du midi de la France.

On ne connaît pas de dépôts pliocènes sur les côtes occidentales des îles Britanniques, et comme il n'y en a pas non plus sur la côte orientale des États-Unis, on en peut inférer que la forme actuelle de l'Atlantique septentrional est de date très récente. Cette conclusion est d'autant plus probable que, ainsi que nous l'avons déjà dit, en comparant la faune tertiaire des Antilles avec celle de la Méditerranée, on constate une telle analogie qu'il faut admettre à cette époque, entre les deux bassins, une communication à peu près continue, le long d'une chaîne d'îles ou d'un continent, qui auraient dis-

paru depuis, faisant naître ou tout au moins agrandissant la dépression du nord de l'Atlantique.

Régions méditerranéennes. — Pendant le dépôt des marnes marines du Plaisantin, du Bolonais et du Vatican, le régime lacustre des régions orientales s'accuse par le dépôt des *argiles à paludines* de la Croatie et de la Slavonie, bientôt suivi par celui des couches à *vivipares* de la Roumanie, contemporaines des sables jaunes marins de l'Astésan. Alors, tandis que la mer rentre dans ses limites actuelles, le val d'Arno se tapisse de graviers fluviatiles à ossements d'*Elephas meridionalis*. C'est l'époque où le buccin du Groenland, la cyprine d'Islande, et plusieurs autres espèces des mers froides apparaissent subitement en Sicile et en Calabre, sans doute à la faveur d'un approfondissement momentané du détroit de Gibraltar; car l'existence de ces espèces dans la Méditerranée ne sera qu'éphémère.

§ 7

ÉRUPTIONS DE L'ÈRE TERTIAIRE

Premières éruptions tertiaires. — Après avoir sommeillé, dans notre Europe, pendant presque toute la durée des temps secondaires, l'activité interne s'est réveillée avec l'ère tertiaire. Dès le début, elle s'est manifestée dans la grande zone méditerranéenne et notamment en Inde, où des épanchements *basaltiques* ont couvert, dans le Dekkan, une surface considérable, entremêlant leurs nappes avec des dépôts lacustres qui établissent le passage du crétacé à l'éocène. Ensuite les éruptions se sont produites en Occident, sous la forme de *basaltes* intercalés, dans le Vicentin, au milieu de l'éocène supérieur. On pense qu'il convient de rapporter à la même époque la sortie des *euphotides* et des *serpentines* de Toscane, de Ligurie et d'Émilie, ainsi que plusieurs des émissions d'*ophites* des Pyrénées. C'est aussi à ce moment que se seraient fait jour les *granites* récents de l'île d'Elbe, du Portugal et de la côte de Tunisie. Ces roches, qui semblent indiquer un effort des masses acides pour reproduire

les types granitiques des premiers âges, sont des *granulites* ou des *microgranulites*, se rapprochant des trachytes par l'état vitreux de leur feldspath.

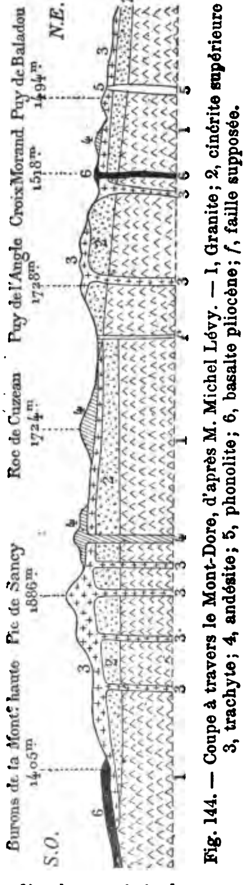


Fig. 144. — Coupe à travers le Mont-Dore, d'après M. Michel Lévy. — 1, Granite ; 2, cinérite supérieure ; 3, trachyte ; 4, andésite ; 5, phonolite ; 6, basalte pliocène ; *f*, faille supposée.

Auvergne. — La grande phase d'activité des éruptions tertiaires est la période qui va du miocène à la fin du pliocène, c'est-à-dire qu'elle coïncide avec les mouvements du sol qui ont produit la chaîne des Alpes.

Ce sont d'abord des *basaltes* qui, en Auvergne comme dans les provinces rhénanes, se font jour dès le miocène. Puis se dessinent les remarquables centres volcaniques du Cantal et du Mont-Dore. Le premier, après de grandes éruptions d'*andésite* et de *brèche andésitique*, avec projections de *cinérites*, répand autour de lui un véritable déluge de *basalte*, qui déborde partout sur les schistes cristallins, engendrant les plateaux de Mauriac et de la Planèze.

Au Mont-Dore, la série a débute par des *cinérites*, comme celles de la Bourboule, avec quelques coulées discontinues de *trachyte* et de *phonolite*. Alors s'est épanché, terminant le pliocène inférieur, un *basalte* porphyroïde ou à grands cristaux, celui de Pardines près d'Issoire. A ce moment, des dislocations importantes se sont produites et une nouvelle pluie de *cinérites* a précédé les grandes coulées de *trachytes*, d'*andésites* et de *phonolites* de la région. Après quoi le pliocène a été clos par la sortie d'un *basalte* qui correspond à celui des plateaux du Cantal (fig. 144). Mais les éruptions ne sont pas pour cela terminées, et on les verra se poursuivre pendant les temps

quaternaires, pour édifier les cônes volcaniques de la chaîne du Puy de Dome.

Dans le Velay, d'importantes éruptions de *phonolites* se sont produites lors du pliocène moyen; puis sont venues des coulées d'un *basalte* sans feldspath, ou *limburgite*, auxquelles sont subordonnées les célèbres brèches ignées du Puy. Le tout a été recouvert par des tufs de projection, de l'époque du pliocène supérieur, précédant la sortie d'un *basalte* contemporain de celui des plateaux du Cantal. Une nouvelle coulée basaltique, celle de la Denise, est alors venue former le fond sur lequel se sont étalés les graviers quaternaires.

Les appareils volcaniques qui ont produit ces éruptions tertiaires sont aujourd'hui oblitérés, l'érosion pluviale et glaciaire ayant eu un long temps à sa disposition pour faire disparaître les cratères et les cônes de débris. Ce n'est que parmi les derniers basaltes du pliocène supérieur que l'on parvient encore à retrouver des cratères à demi conservés.

Allemagne, Hongrie, Italie. — Pendant la sortie des premiers basaltes d'Auvergne, la région des Sept-Montagnes, sur le Rhin, a rejeté des *trachytes* et des *andésites*, précédés et suivis par des *basaltes*.

En Hongrie et en Transylvanie, les éruptions qui ont amené la sortie des *andésites à pyroxène* sont un peu plus anciennes et datent de l'oligocène. Elles ont été suivies par des épanchements miocènes d'*andésites à amphibole*. Enfin au pliocène appartiendraient les *rhyolites* de la contrée, roches très acides, parfois porphyriques et vacuolaires (*porphyres molaires*), parfois sphérolithiques, en petits globules brillants (*perlites*).

Ainsi, d'une manière générale, on peut dire que l'activité volcanique a été continue depuis le début de l'ère tertiaire jusqu'à nos jours. A mesure que le continent européen se dessinait, les manifestations éruptives étaient de plus en plus rejetées vers les rivages de la Méditerranée, où elles sont de nos jours exclusivement concentrées. A toute époque elles occupaient le bord des fractures limitant des compartiments effondrés.

CHAPITRE IX

ÈRE MODERNE OU QUATERNAIRE

§ 1

GÉNÉRALITÉS SUR L'ÉPOQUE PLEISTOCÈNE

Définition de l'époque pleistocène. — La partie de l'ère moderne qu'on a désignée sous le nom d'*époque quaternaire*, et qu'avec Lyell nous appellerons *pleistocène*, pour réserver l'autre qualificatif à l'ensemble de cette époque et des temps actuels, est caractérisée par l'apparition de l'homme sur le globe.

Depuis que ce grand fait s'est produit, le monde organique ne s'est enrichi d'aucune espèce nouvelle; mais plusieurs formes ont disparu parmi celles qui faisaient cortège aux premiers hommes, et les grands mammifères herbivores, déjà sur leur déclin vers la fin de la période pliocène, ont vu leurs principaux représentants quitter peu à peu la scène du monde ou se retirer dans les régions méridionales.

Il semblerait donc que l'étude de l'époque pleistocène ne dût pas être séparée de celle des phénomènes actuels, si cette phase de l'histoire du globe n'avait été marquée par un événement considérable; nous voulons parler d'un changement momentané de climat qui, en imprimant, dans toute la zone tempérée, une activité extraordinaire aux précipitations atmosphériques, a permis aux phénomènes d'érosion et d'alluvionnement de se manifester sur une échelle grandiose. Comme conséquence de ce changement, de grandes nappes de neiges et de glaces ont couvert les massifs montagneux ainsi que les régions septentrionales, produisant, au moins dans toute l'Europe, un refroidissement marqué. Plus tard seulement la température s'est radoucie et le régime actuel

s'est établi avec l'âge des tourbières et des habitations lacustres. De cette manière, tandis que, de nos jours, l'action des glaciers et des rivières sur la surface terrestre est réduite à des proportions presque insignifiantes, cette action a suffi, au début de l'ère moderne, pour étaler sur de grandes étendues des dépôts parfois très épais.

La période pleistocène a d'ailleurs vu s'accomplir des changements géographiques de sérieuse importance. L'ouverture de la Mer Egée, résultat du morcellement d'une ancienne terre des Cyclades, la mise en communication de cette mer, et par suite de la Méditerranée, avec la Mer Noire, enfin l'écroulement des dernières terres atlantiques, forment un ensemble d'événements bien propre à justifier l'autonomie de la période.

Principe des divisions de l'époque pleistocène. — L'époque pleistocène comporte un certain nombre de divisions, fondées à la fois sur l'examen de la faune et sur l'étude des produits successifs de l'industrie humaine, rencontrés dans les alluvions ou les cavernes.

Parmi les mammifères pleistocènes, il en est qui appartiennent à des espèces aujourd'hui *éteintes*, tandis que d'autres, et avec eux divers mollusques, subsistent encore, mais dans des régions différentes de celles où on trouve leurs restes au sein des dépôts quaternaires. Ce sont des espèces *émigrées*.

Quant à l'industrie humaine, dont les produits commencent à se montrer au cours de la période, ce sont surtout des *silex taillés* par éclats et non polis, auxquels s'associent plus tard des instruments en os ou en ivoire. Ils caractérisent ce degré inférieur de civilisation qu'on a appelé l'*âge de pierre*, ou du moins sa première partie, l'époque *paléolithique*; tandis que l'époque *néolithique*, celle des instruments à surface polie (quelquefois qualifiés de *haches celtiques*), associés aux outils de bronze, marque déjà l'aurore des temps historiques.

Phases successives de l'époque pleistocène. Faune chaude. Industrie chelléenne. — En considérant simultanément les deux catégories de restes pleistocènes, on est conduit à établir la succession suivante, au moins pour l'Europe :

A la fin du pliocène, notre sol était habité par un ensemble

de grands animaux que caractérise surtout *Elephas meridionalis.*

Lorsque le régime pleistocène s'est établi, les vallées, creusées à une profondeur très peu différente de celle qu'elles ont aujourd'hui, ont commencé à voir leur fond se tapisser d'alluvions, en rapport avec les variations successives du niveau de la mer ou du régime météorologique.

Dans les vallées de la Somme et de la Marne, on constate que, vers la base de ces *alluvions anciennes*, dominent les *Elephas antiquus*, *Hippopotamus major*, *Rhinoceros Merckii.* La présence des hippopotames, jointe à celle d'un mollusque aujourd'hui relégué dans les rivières méridionales, *Corbicula fluminalis*, permet d'affirmer que la température était alors plus élevée que de nos jours. Cet ensemble mérite donc le nom de *faune chaude.*

Or c'est en compagnie des débris de cette faune, et roulés avec eux dans les alluvions, qu'on trouve les plus anciens silex taillés, c'est-à-dire le *coup de poing* amygdaloïde de Chelles-sur-Marne, caractéristique de l'industrie *chelléenne.*

Faunes froides. Industries acheuléenne, moustérienne, magdalénienne. — Un peu plus tard apparaissent des outils, moins grossiers et moins roulés, où le coup de poing est déjà accompagné de *râcloirs.* En même temps la faune se modifie; les hippopotames ont disparu; on voit dominer le mammouth (*Elephas primigenius*), avec *Rhinoceros tichorhinus*, c'est-à-dire des espèces pourvues de poils ou de toison laineuse, accusant le refroidissement du climat. C'est donc une *faune froide* qui s'associe aux restes de l'industrie *acheuléenne* (de St. Acheul près d'Amiens).

A celle-ci succède l'industrie *moustérienne*, des silex taillés sur une seule face, avec coup de poing nettement lancéolé, râcloirs et grattoirs. Les instruments de silex ont généralement une patine blanchâtre bien marquée. Le mammouth persiste et le caractère froid de la faune s'accuse par la présence du renne (*Cervus* ou *Rangifer tarandus*).

Vient ensuite, par l'intermédiaire d'une phase *solutréenne* (de Solutré en Bourgogne), où abondent les lames de silex très bien taillées en feuille de laurier, l'industrie *magda-*

lénienne, celle des cavernes et des abris sous roche. Les silex y sont mêlés à des instruments sculptés d'ivoire ou de bois. Si le mammouth subsiste, il est en voie d'extinction. L'animal caractéristique est le *renne*, accompagné d'une faune de rongeurs caractéristiques des *steppes*. Le froid sec de l'époque oblige l'homme à chercher un abri dans les grottes.

Enfin le retour de l'humidité amène une faune de *forêts*, où se montre le cerf. En même temps l'industrie *paléolithique* prend fin, cédant la place à celle de la pierre polie (*néolithique*), contemporaine des *tourbières* qui s'établissent dans les vallées à la faveur des nouvelles conditions climatériques.

Ancienne extension des glaciers. Terrain erratique. — En parallèle avec les divisions qui viennent d'être établies, il convient de mettre celles auxquelles peut conduire l'examen des dépôts qui se sont formés, sous l'influence des glaces, autour des massifs que celles-ci occupaient, pendant que, dans la partie inférieure des vallées, se déposaient les alluvions fluviales.

L'invasion des glaces n'a pas été un phénomène unique, caractérisant une phase déterminée des temps pleistocènes. Elle s'est reproduite à plusieurs reprises, et il y a eu des moments où elle a eu assez d'ampleur pour étaler sur toutes les contrées boréales un terrain de transport dit *erratique*. Ce terrain couvre en Europe (fig. 145) plus de *six millions* et, dans l'Amérique du nord, au moins *quinze millions* de kilomètres carrés.

Le dépôt erratique, mélange d'argile et de blocs anguleux souvent striés, est le produit de la trituration du terrain sous-jacent par d'immenses lobes de glace. Ceux-ci, prenant leur origine en Amérique dans la région des lacs laurentiens, en Europe sur le centre de la Scandinavie, ont construit une ligne plus ou moins continue et sinueuse de moraines terminales, à l'endroit où se dessine aujourd'hui la limite méridionale du terrain erratique.

En même temps que se formait ce dépôt, essentiellement septentrional, et dont certains blocs ont accompli un parcours vers le sud d'au moins 1500 kilomètres, tous les massifs montagneux de l'Europe, Alpes, Caucase, Pyrénées, Vosges,

Auvergne, ainsi que les Montagnes Rocheuses, étaient envahis par de grands glaciers, qui semaient tout à l'entour un terrain analogue au précédent, à des distances parfois considérables du massif d'où les matériaux étaient dérivés. A ce moment, les glaces couvraient dans les Alpes 150 000 kilomètres carrés, au lieu de 4 000 qu'elles occupent aujourd'hui.

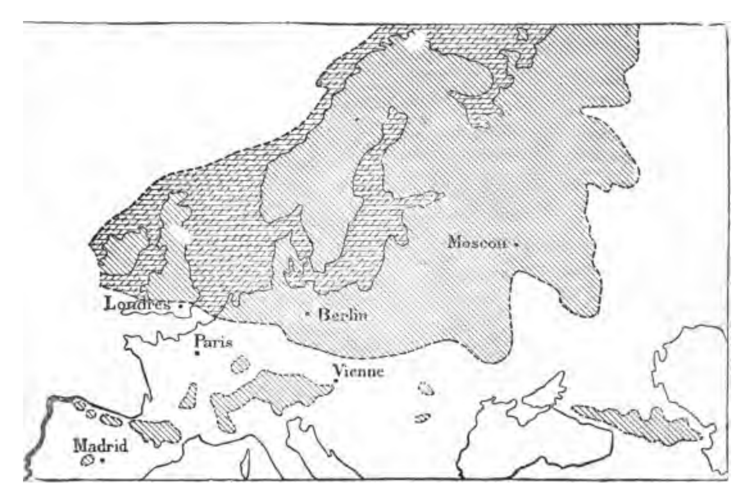


Fig. 145. — Carte du terrain occupé en Europe par les glaces pleistocènes au moment de leur plus grande extension.

Non seulement la composition du terrain erratique ne laisse aucun doute sur son origine glaciaire, mais l'abondance, à sa base, des surfaces polies et cannelées, atteste que c'est sous le poids de véritables glaciers que le terrain s'est formé, de sorte qu'il est impossible d'en attribuer le dépôt à des glaces flottantes.

Vicissitudes du phénomène glaciaire. — Nous avons dit que le phénomène de l'extension des glaces s'était produit à plusieurs reprises, deux phases successives d'extension ayant été séparées par une époque *interglaciaire*. Pour ce motif, il serait inexact de vouloir appliquer aux temps pleistocènes la

qualification d'*époque glaciaire*, puisque la formation des glaces y a été souvent interrompue.

Si, dans les contrées boréales, occupées par le dépôt erratique, scandinave ou laurentien, il est facile de distinguer deux époques de progression, l'analyse peut être poussée plus loin autour d'un massif montagneux, tel que celui des Alpes ou des Pyrénées.

Les études de MM. Penck, Brückner et Obermaier ont

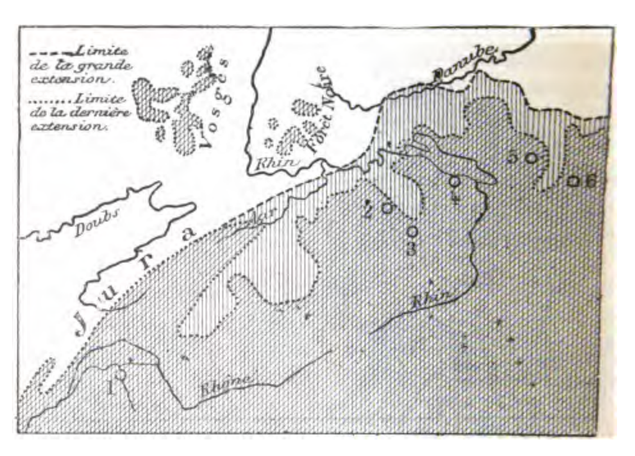


Fig. 146. — Carte des deux dernières extensions glaciaires en Suisse (d'après M. Brückner) : 1, ancien delta de la Drance ; 2 à 6, gisements interglaciaires classiques.

montré que, pour ces deux massifs, on pouvait reconnaître les traces de *quatre extensions glaciaires*. Cette distinction est fondée sur les rapports de composition et de situation des *cailloutis fluvio-glaciaires* ou *schotter*, qu'engendrait, à chaque époque, le stationnement des lobes glaciaires, la moraine frontale de chacun d'eux passant progressivement à des alluvions torrentielles.

Principales phases d'extension. — En appliquant ce diagnostic, on a reconnu que les anciens cailloutis fluvio-glaciaires pouvaient être répartis en deux groupes principaux :

Ceux du premier groupe se présentent aujourd'hui en *nappes* (d'où le nom de *deckenschotter*) ou plutôt en lambeaux de nappes, étalés sur des plateaux. On distingue les cailloutis des *hauts plateaux*[1], et ceux des *bas plateaux*, entaillés dans les précédents. Par suite d'une longue exposition à l'air, ces deux sortes de dépôts ont perdu, surtout les premiers, la plupart de leurs caractères morainiques originels.

Les cailloutis du second groupe, beaucoup plus facilement reconnaissables, se sont formés à une époque où la topographie de la région en avant des montagnes s'était déjà profondément modifiée, se rapprochant de celle du temps présent. Toujours ils sont localisés *aux flancs des vallées actuelles*, où ils dessinent des *terrasses*. Il y a les *hautes terrasses*, à une centaine de mètres au-dessus du fond des vallées, et les *basses terrasses*, dominant habituellement ce fond de 30 à 35 mètres.

Moraines internes. Moraines externes. Dépôts interglaciaires. — Tandis que les moraines de la première extension sont très difficilement reconnaissables, on peut reconstituer assez aisément les limites atteintes par la seconde et la troisième, et constater que toutes deux se sont avancées plus loin que la quatrième, dont les moraines sont encore tellement fraîches qu'on les dirait déposées d'hier. Ces dernières, bien que situées fort en avant des glaciers actuels, sont, par rapport aux précédentes, du côté intérieur du massif. Aussi leur donne-t-on le nom de moraines *internes*, la qualification d'*externes* s'appliquant aux deux autres. Aux époques où celles-ci se sont formées, la limite des neiges était descendue à 1 200 ou 1 300 mètres plus bas qu'aujourd'hui.

La figure 146 fait connaître la situation réciproque des moraines internes de la Suisse et des moraines externes de l'avant-dernière extension.

Dans l'intervalle des diverses extensions, le massif alpin a été débarrassé de glaces au moins autant qu'aujourd'hui, comme le prouvent la situation et l'altitude de certains

1. Ce sont ceux que nous avons déjà mentionnés à propos du pliocène.

dépôts *interglaciaires*, dont la faune et la flore accusent une température encore plus favorable que celle du temps présent.

Chronologie des dépôts glaciaires. — Il y a grand intérêt à établir la correspondance de ces vicissitudes avec les phases de l'époque pleistocène, en définissant les rapports des cailloutis morainiques avec les gisements contenant des débris d'animaux ou des restes bien définis d'industrie humaine.

D'après les dernières études, faites dans les Pyrénées par M. Obermaier, le moustérien se montre contemporain de la dernière extension des glaces, à laquelle tous les gisements magdaléniens seraient nettement postérieurs.

Il paraît ainsi raisonnable de rattacher la première apparition caractérisée de l'industrie humaine, c'est-à-dire le *chelléen*, à la *dernière période interglaciaire*, dont elle caractériserait la phase chaude, suivie par une phase froide, répondant à l'acheuléen. L'accentuation du froid humide, engendrant la *dernière extension glaciaire*, aurait coïncidé avec la phase moustérienne. Immédiatement après le départ des glaces, l'établissement d'un froid sec, précédé par une phase solutréenne, favorable aux chevaux, aurait marqué l'époque magdalénienne, dont la transition au néolithique s'accomplirait par les dépôts de la caverne du Mas d'Azil, à galets coloriés, lesquels correspondraient à peu près aux *déchets de cuisine* ou *kjoekkenmöddings* des côtes du Danemark.

Les observations faites en Scandinavie et en Amérique, notamment dans la gorge postglaciaire du Niagara, permettent d'évaluer à sept ou huit mille ans le temps qui nous sépare de la fin de la dernière extension glaciaire. Quant à la durée que cette extension a pu embrasser, comme à celle de la phase interglaciaire précédente, on manque absolument de données précises à cet égard.

Le bronze n'a apparu en Scandinavie que dix siècles avant notre ère.

§ 2

DÉTAILS SUR LES DÉPOTS PLEISTOCÈNES

Catégories de dépôts quaternaires. — Les dépôts pleistocènes se ressentent nécessairement, dans leur composition, de la cause particulière qui leur a donné naissance. Par suite, il y a lieu de distinguer : 1° les dépôts formés sous l'influence de la grande nappe des contrées septentrionales;

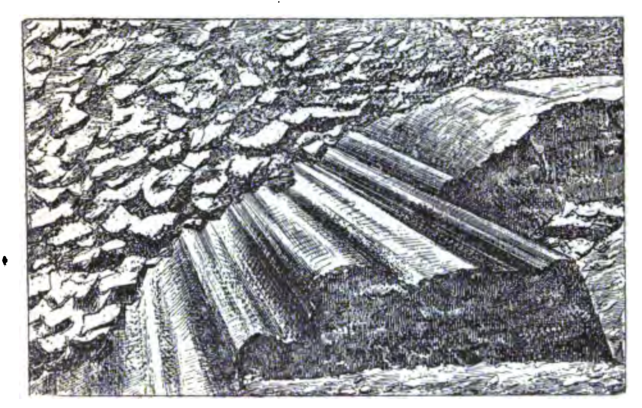


Fig. 147. — **Roches calcaires cannelées, recouvertes de drift, à l'île Kelley, sur le lac Érié.**

ce sont ceux qui constituent le *drift, till* ou *terrain erratique*, ou encore le *diluvium du nord*; 2° les dépôts résultant de l'action directe des glaciers proprement dits dans les régions montagneuses; ce sont surtout les anciennes *moraines*, les *blocs erratiques* et les *cailloutis fluvio-glaciaires*; 3° enfin les dépôts produits par l'action directe des grands cours d'eau et des pluies, c'est-à-dire les *alluvions* et les *limons*.

Terrain erratique du nord. — Le terrain erratique du nord est surtout formé par un limon argileux avec cailloux anguleux ou roulés, qualifié d'*argile à blocaux* ou *boulder-clay*. C'est la moraine de l'ancienne nappe glaciaire, qui

a semé sur le Brandebourg, la Poméranie et la Russie, de nombreux blocs de provenance scandinave ou finlandaise. La grosseur de ces blocs diminue à mesure qu'on s'éloigne des centres de dispersion. Plusieurs ont certainement parcouru 1 000 kilomètres, et il en est en Poméranie qui mesurent plus de 800 mètres cubes.

Les roches sur lesquelles la glace a dû passer ont été striées et polies, comme on le voit bien dans le sud de la Scandinavie et même encore aux environs de Berlin, sur l'îlot triasique de Rüdersdorf. La même chose a lieu en Amérique, où la région des Grands Lacs montre de beaux exemples de ces roches cannelées et polies (fig. 147).

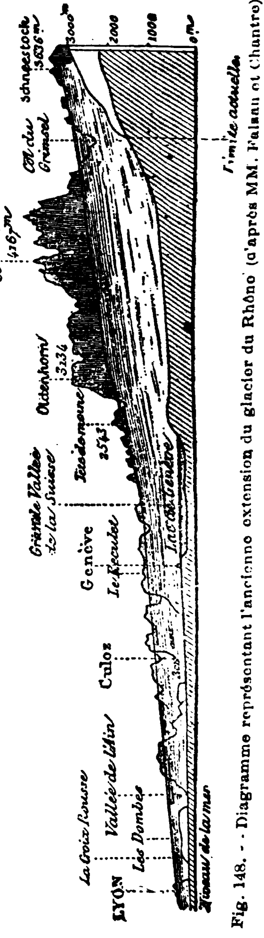


Fig. 148. — Diagramme représentant l'ancienne extension du glacier du Rhône (d'après MM. Falsan et Chantre).

On distingue deux nappes d'argile à blocaux, séparées dans le Brandebourg par des lentilles de sables fluviatiles interglaciaires. Tout l'espace occupé par la nappe supérieure se reconnaît à la multitude des cavités lacustres. Celles-ci ont disparu de la bande que la nappe supérieure n'a pas recouverte, l'érosion ayant disposé d'un temps suffisant, depuis sa mise à découvert, pour y assurer l'écoulement régulier des eaux. La nappe inférieure se montre seule en Russie au delà d'une ligne allant du lac Ladoga à Arkhangel.

Moraines, blocs erratiques. — Les anciens glaciers ont eu, dans les massifs montagneux, un développement considérable, qui leur a permis de laisser des traces de leur passage en des

points bien éloignés de leur domaine actuel. C'est ainsi qu'en Suisse les glaciers du Rhône, réunis à ceux du Mont Blanc, formaient une masse assez puissante pour ensevelir toute la plaine helvétique, déborder en quelques points la crête du Jura, et s'avancer jusqu'à Lyon (fig. 148).

De même, de grands glaciers descendaient des Pyrénées, et l'un d'eux, après avoir suivi la vallée d'Argelès, se courbait à Lourdes en polissant les rochers pour prendre la direction du Gave, tout en semant au nord des cailloutis épais.

Les traces des anciens glaciers sont d'abord des moraines,

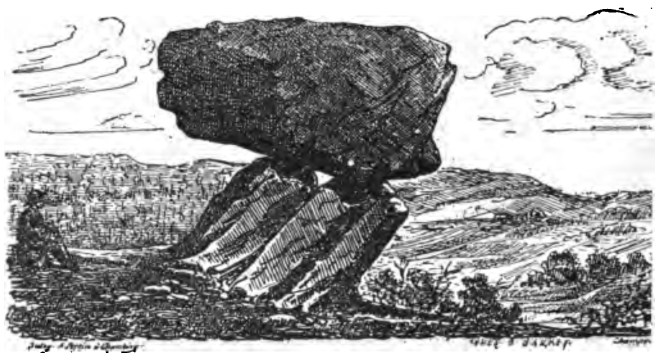


Fig. 149. — Bloc perché près du Bourget (d'après MM. Falsan et Chantre).

reconnaissables à leur teinte grise, ainsi qu'aux cailloux anguleux, souvent frottés ou rayés, qu'elles renferment. Les glaciers ont aussi semé, à des altitudes diverses et dans des situations parfois étranges, des *blocs erratiques* (fig. 149), qui permettent de reconstituer leur ancien parcours. Tels sont la *Pierre-à-Bot*, originaire du Valais et échouée sur le flanc du Jura, près de Neuchatel, et le *Pflugstein*, arrivé des Alpes de Glaris jusqu'à Zurich. Le premier bloc a 16 mètres de long sur 5 de large et 13 de haut. Le second a 20 mètres de hauteur. C'est par de tels blocs qu'on a pu s'assurer que les anciens glaciers de la Suisse avaient franchi le Jura vers 1 200 mètres d'altitude et que les Vosges, ainsi que l'Auvergne, avaient eu aussi leurs glaciers.

En outre, une trace incontestable du passage des glaces consiste dans les *polis glaciaires*, qu'on observe aujourd'hui dans toutes les vallées où les agents atmosphériques ne les ont pas fait disparaître, et qui témoignent, mieux que toute autre chose, de la hauteur primitivement occupée par les glaces, dans ces gorges dont les derniers temps pliocènes avaient vu le creusement.

Alluvions, loess et limons. — Dans les pays où l'action glaciaire ne se faisait pas sentir, les cours d'eau ont laissé à différentes hauteurs, sur les flancs des vallées actuelles, par suite des alternatives de comblement et de déblaiement (dues

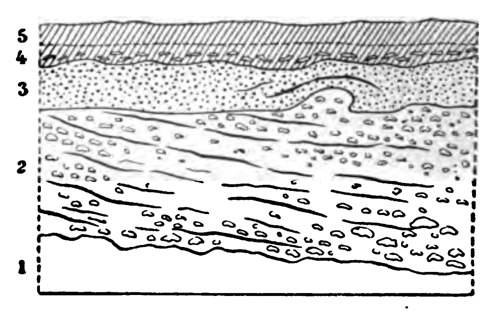


Fig. 150. — Disposition des alluvions pleistocènes en Picardie : 1, craie ; 2, graviers ; 3, sable gras ; 4, loess à cailloux anguleux ; 5, limon brun.

sans doute à des mouvements contraires du sol), des nappes d'alluvions, formées de cailloux roulés, de gráviers, de sables et de limons. En général, la superposition est la suivante (fig. 150) : en bas, un *gravier de fond*, avec gros cailloux, diminuant de volume vers le haut et mélangés de sables ; puis un *sable gras* ou alluvion de rive, déposé dans des eaux plus tranquilles ; enfin une boue calcarifère jaunâtre, à grain fin, dite *loess*, devenant à la surface d'un brun rouge foncé.

Sur les plateaux, où l'action fluviale ne s'est certainement pas exercée, par exemple, sur les plaines de la Picardie et de la Normandie, on retrouve le *loess* jaunâtre, surmonté du *limon des plateaux* ou *terre à briques*. Il est aisé de reconnaître dans le loess un *produit de ruissellement*, dû aux pluies abon-

dantes de l'époque pleistocène. Celles-ci, ravinant les sédiments meubles, autrefois répandus à la surface des plateaux ou remaniant les produits de l'altération sur place des roches, laissaient sur les hauteurs les débris impalpables sous la forme du loess. Plus tard, l'action des eaux d'infiltration, et plus encore les alternatives de la température, à l'époque où le sol était gelé dans la profondeur, ont *oxydé* et *rubéfié* la surface du loess, dissolvant le calcaire, transformant le loess en limon et faisant éclater les silex qu'il contenait. Cette rubéfaction n'a pas pénétré partout à la même profondeur,

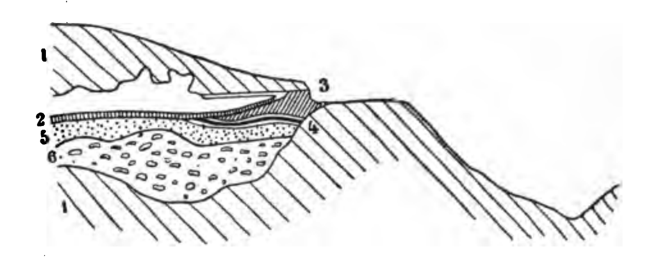


Fig. 151. — Coupe d'une caverne pleistocène. — 1, calcaire; 2, plancher stalagmitique moderne; 3, brèche à ossements; 4, couche noire; 5, limon des cavernes; 6, cailloux roulés.

en sorte que, si l'on s'en rapportait à la couleur, on croirait voir un *diluvium rouge*, superposé en discordance aussi bien au limon qu'aux cailloutis non rubéfiés ou *diluvium gris*.

Le phénomène qui a engendré le loess a dû se reproduire à diverses reprises. Dans l'ensemble, l'âge des dépôts de loess de nos régions paraît s'échelonner surtout entre la dernière extension glaciaire (époque du mammouth dominant) et l'époque du renne. Quant au loess de la Chine, le vent paraît avoir eu une grande part à la dissémination des poussières qui le composent.

Dépôts des cavernes. — Pour compléter l'énumération des dépôts pleistocènes, il est nécessaire de parler de ceux qui se sont formés dans les grottes ou *cavernes*, étagées à diverses hauteurs sur les flancs calcaires de certaines vallées.

Pendant les périodes très humides, le phénomène de l'infiltration s'y est produit avec une grande activité, faisant naître d'épais revêtements et planchers *stalagmitiques*, où l'on trouve incrustés les ossements des animaux qui fréquentaient les grottes. Quelquefois les pluies et même les cours d'eau y pénétraient, donnant lieu à des dépôts de graviers, plus ou moins enchevêtrés avec des nappes de stalagmites (fig. 151), ou même avec des couches de cendres, témoins de l'habitation temporaire des grottes par l'homme. Enfin, lors de la dernière période froide, qui avait complètement interrompu les infiltrations, le loess du dehors, pendant les dégels de l'été, a souvent pénétré à l'état de bouillie, dans l'intérieur des cavernes, par des fentes s'ouvrant à la surface. Ainsi le sol de beaucoup de grottes s'est tapissé d'un *limon rouge des cavernes*, avec éclats anguleux de silex, souvent avec ossements de renne, parfois assez abondants pour transformer le dépôt en une *brèche ossifère*. Après quoi, la formation des stalagmites a repris avec le retour de l'humidité dans la période actuelle.

§ 3

CAUSES DES PHÉNOMÈNES GLACIAIRES

Hypothèses astronomiques. — L'invasion des glaces ayant été le fait saillant de l'époque pleistocène, on a cherché naturellement à l'expliquer par des combinaisons de circonstances astronomiques, qu'on jugeait propres à augmenter la différence de température moyenne entre les deux hémisphères. C'est ainsi qu'en supposant l'excentricité terrestre beaucoup plus grande, et en admettant que le petit axe de l'orbite terrestre vînt à coïncider avec la ligne des solstices, on a cru pouvoir établir que chaque hémisphère pourrait, à son tour, subir des hivers si rigoureux, que l'influence de l'été ne suffirait pas à fondre les neiges tombées, d'où résulteraient des états glaciaires alternatifs.

Mais, d'une part, d'éminents physiciens ont dû reconnaître que les circonstances invoquées ne semblaient pas de nature à provoquer une augmentation dans la chute des neiges.

D'autre part, pour retrouver dans le passé des conditions astronomiques conformes, il faudrait remonter à plus de deux cent mille ans. Or les observations concordantes de divers géologues semblent avoir établi bien clairement qu'il ne s'est pas écoulé beaucoup plus de huit mille ou dix mille ans depuis le départ des dernières glaces américaines, et la fraîcheur remarquable des formes topographiques, dans les pays atteints par la dernière invasion, ne permet pas de supposer qu'une longue suite de siècles ait passé sur ce terrain. Autrement ces caractères eussent été en grande partie oblitérés.

Conditions nécessaires à l'établissement des glaciers. — Il importe d'ailleurs de remarquer que ce n'est pas le froid qui engendre les grands glaciers, mais bien une augmentation notable de la quantité de neige. Or ce qui tombe en neige, sur les montagnes ou dans les hautes latitudes, tombe en pluie sur les régions tempérées. Donc, pour obtenir de grands glaciers, il faut une cause puissante d'évaporation, combinée avec des causes également puissantes de condensation. En un mot, c'est à une exagération momentanée des précipitations atmosphériques qu'il faut demander l'explication du phénomène.

Du reste, il ne s'agit pas là d'une simple hypothèse. En Amérique, dans le territoire aujourd'hui si sec du Grand Bassin, on retrouve les traces de deux lacs considérables, qui occupaient le pays à l'époque pleistocène. Des terrasses de tufs, que ces lacs ont laissées sur leurs bords, à diverses altitudes, permettent de se rendre compte de leurs variations de niveau, et fournissent la preuve qu'à deux reprises, coïncidant justement avec les deux extensions glaciaires, la hauteur des lacs, véritables *pluviomètres* de l'époque, a passé par un maximum.

L'activité souvent déployée par les cours d'eau pleistocènes, et dont témoignent d'importants dépôts d'alluvions, vient encore à l'appui de cette manière de voir.

Considérations géographiques. — D'un autre côté, il suffit de jeter les yeux sur des cartes du terrain erratique pour voir à quel point la répartition de ce terrain est indépen-

dante de la latitude. C'est ainsi qu'*il n'en existe aucune trace en Sibérie*, le pays le plus froid du monde; dans l'Himalaya, le plus puissant de tous les massifs montagneux, on n'observe rien qui trahisse une ancienne extension tant soit peu notable des glaciers de la chaîne. De tels faits doivent suffire pour exclure les hypothèses cosmiques.

Dans cet état, il ne reste à invoquer que des raisons géographiques. On se convaincra de suite de l'importance de ces dernières, si l'on réfléchit que le phénomène glaciaire sévit dans toute sa force sur le Groenland, où il est incomparablement plus intense que sur les terres plus voisines du pôle, ce qui ne peut être expliqué que par l'altitude et la position particulière qu'occupe l'île groenlandaise, au point de rencontre de plusieurs courants d'air, dont quelques-uns y arrivent fortement chargés de vapeur d'eau.

L'idée vient alors d'étudier de plus près les limites du terrain erratique du nord. On ne peut manquer, en réunissant à ce point de vue l'Europe et l'Amérique, de s'apercevoir que la limite méridionale du grand dépôt glaciaire dessine un cercle dont le centre est dans l'Atlantique nord, et que c'est suivant l'axe même de cet océan que le phénomène a eu le plus d'intensité.

Si l'on se rappelle que la fin des temps tertiaires a été précisément marquée par l'écroulement définitif des terres qui barraient l'Atlantique nord, si bien que c'est seulement avec la terminaison du pliocène, lors du sicilien, que des colonies de mollusques arctiques ont pu pénétrer dans la Méditerrannée, il paraîtra raisonnable de s'arrêter à l'hypothèse suivante :

Hypothèse atlantique. — Avant la surrection des Alpes, une terre se dressait à la place de l'Atlantique nord, empêchant tout mélange entre les eaux froides du pôle et les eaux subtropicales du golfe des Antilles ou de la Méditerranée. Quand cette *Atlantide* a été assez morcelée pour permettre le mélange en question, un grand trouble a dû survenir dans la distribution des courants. Des vents issus de la région tropicale ont pu arriver avec les courants marins jusque dans les pays circumpolaires et y décharger brusquement leur

vapeur d'eau. De là des chutes extraordinaires de pluie et de neige dans les parages atlantiques. Les terres qui s'effondraient alors, tantôt abaissées, tantôt relevées, devaient offrir à de certains moments une altitude particulièrement propice à ces condensations. Et comme l'équilibre définitif n'a pu s'établir sans que la mesure ait été plus d'une fois dépassée dans un sens ou dans l'autre, on s'explique que le phénomène ait eu des alternatives, et que plusieurs invasions glaciaires aient été séparées par des intervalles d'un tout autre régime.

Quant aux conditions actuelles, elles pourraient trouver leur explication, non seulement dans l'assiette définitivement acquise par les terres boréales, mais dans l'établissement tardif du courant du Gulf Stream, dont l'influence assure à nos régions une douceur de climat que leur latitude semblerait devoir interdire.

§ 4

ÉRUPTIONS PLEISTOCÈNES

Auvergne. — En Auvergne, les éruptions pleistocènes ont suivi sans discontinuité celles de la fin du pliocène. C'est à cette époque que s'est formé, sur le flanc du Mont-Dore, le cratère du Tartaret, et que se sont épanchées, sur le fond des vallées de Besse et de Compains, de belles coulées de lave à surface déchiquetée. En même temps, une ancienne fente, qui avait autrefois livré passage à du granite, s'est ouverte de nouveau sur le plateau qui domine la Limagne. Les projections y ont édifié les remarquables cônes de la chaîne du Puy de Dôme, dont la formation paraît avoir coïncidé avec l'âge du renne. De ces cratères sont sorties des laves, les unes *andésitiques*, par exemple celle de Volvic, les autres *basaltiques*, comme celle qui, divisée en beaux prismes verticaux, occupe la vallée de la Sioule, près de Pontgibaud.

Pendant ce temps, le Velay voyait s'accumuler des *tufs*, où l'on a trouvé, à la Denise, des ossements humains.

Région méditerranéenne, Islande. — Tandis que les éruptions d'Auvergne cessaient avec la période historique, celles

d'Italie, qui n'avaient commencé qu'à la fin du pliocène, se sont poursuivies jusqu'à nos jours.

C'est au début du quaternaire qu'on rapporte les célèbres *tufs* des Champs Phlégréens, près de Naples, tufs sous-marins, mais aujourd'hui soulevés à une grande hauteur. Sur ces tufs, essentiellement *trachytiques*, s'est édifié le volcan de la Somma, au centre duquel le Vésuve proprement dit a pris naissance par explosion en l'an 79 de notre ère.

Les *tufs palagonitiques* de Sicile, qui servent de base à l'Etna, datent de la fin du pliocène ou du commencement du quaternaire. C'est donc à cette dernière période qu'appartient en entier la formation du volcan, qui n'a cessé de rejeter des laves *basaltiques* riches en labrador, mais dépourvues de péridot.

Les volcans de l'Archipel grec, comme celui de Santorin, ont également commencé leurs manifestations à la fin du pliocène, et leurs éruptions coïncident avec les mouvements du sol qui ont déterminé l'ouverture tardive de la mer Égée.

Enfin les éruptions pleistocènes ont été considérables en Islande, dans cette terre qui a dû se ressentir si fortement des effondrements atlantiques.

CHAPITRE X

FILONS MÉTALLIFÈRES. PHÉNOMÈNES OROGÉNIQUES

§ 1

FILONS MÉTALLIFÈRES

Définition des gîtes métallifères. — On sait que, de nos jours, les manifestations volcaniques sont habituellement suivies par des dégagements solfatariens et thermominéraux, qui donnent lieu, dans leurs canaux d'ascension, au dépôt

de diverses substances. C'est à des émanations du même genre, survenues à la suite des anciennes périodes éruptives, qu'est due la formation de la plupart des *gîtes métallifères*. Leur allure ordinaire est celle de *filons*, c'est-à-dire de fentes ouvertes à travers les terrains de l'écorce terrestre et remplies après coup par des *minerais métalliques*, le plus souvent des *sulfures*, associés à des gangues pierreuses.

Formation des filons. — Les fentes où s'établissent les filons métallifères sont généralement très inclinées et voisines de la verticale. Elles résultent des efforts de tension et surtout de *torsion*, auxquels les parties les plus résistantes de l'écorce ont été soumises lors de la formation des montagnes.

Toutes les fois que ces fentes se sont produites dans des roches suffisamment solides, elles sont restées assez ouvertes pour permettre la lente circulation, à la fois des eaux d'infiltration venant de la surface, et des eaux chaudes ascendantes venant de la profondeur. Ces dernières entraînaient en général, au milieu de gaz chlorurés, sulfurés et hydrocarbonés, empruntés au réservoir interne, des sulfures alcalins et, à la faveur de ceux-ci, divers sulfures métalliques. De plus, elles dissolvaient sur leur passage à l'état de silicates et de carbonates, une partie des éléments des roches qu'elles traversaient. Près du jour, la pression et la température étant moins élevées, il se produisait, sous des influences à la fois physiques, chimiques et électriques, des réactions qui amenaient le dépôt, sur les parois des fentes, soit par évaporation, soit par précipitation, de substances concrétionnées ou cristallisées. Partout où l'air extérieur n'avait pas accès, le dépôt se faisait au sein d'un milieu réducteur et il se formait, avec les gangues, des *sulfures* métalliques cristallisés. Mais plus haut, les réactions se compliquaient par le mélange des eaux ascendantes avec les eaux froides superficielles, ces dernières amenant avec elles de l'air et diverses substances dissoutes dans la traversée des roches, enfin, si les fentes débouchaient sous la mer, des sels, chlorures, bromures, sulfates, etc. Aussi trouve-t-on la partie supérieure des filons notablement *oxydée*. La *limonite* ou peroxyde de fer hydraté y domine, d'où le nom de *chapeau de fer* qu'on lui donne.

En général, entre le chapeau de fer, qui caractérise la *zone d'oxydation*, et les régions profondes occupées par les minerais sulfurés, il existe une zone intermédiaire, dite *zone de cémentation*. L'accès moins facile de l'air s'y traduit par des réactions spéciales, qui mettent en jeu des différences de solubilité des sulfates et des carbonates engendrés par l'altération des minerais. Ceux-ci peuvent alors être précipités à l'état *natif*, ou se trouver engagés dans de nouvelles combinaisons sulfurées. D'ordinaire, la zone de cémentation est caractérisée par un notable enrichissement en métaux précieux. C'est dans son domaine que s'accomplit la transformation de la pyrite de cuivre en cuivre sulfuré et cuivre panaché.

Minerais d'étain. — Les minerais d'*étain* ont toujours accompagné, plutôt que suivi, la sortie des *granulites* à mica blanc et tourmaline. Ils remplissent moins des fentes définies que des réseaux de veinules, formant comme une auréole à la périphérie des noyaux granulitiques (Cornouailles, Bretagne, Limousin). La facilité avec laquelle l'étain s'oxyde a déterminé son dépôt à l'état d'*étain oxydé* ou *cassitérite*, disséminé en cristaux bruns dans le *quartz*, souvent avec émeraude et apatite (phosphate de chaux).

Minerais d'or. — L'*or* paraît être venu en compagnie de la *pyrite de fer*, au moment de l'éruption de roches *dioritiques*. Mais les dissolutions qui déposaient dans la profondeur, avec du *quartz*, une pyrite aurifère, ont dû, près de la surface, abandonner le fer à l'état d'oxyde, tandis que l'or *natif* se précipitait, en grains ou en *pépites*, au sein du quartz. Ou bien encore la décomposition des pyrites aurifères a pu être le résultat de l'infiltration des eaux oxydantes superficielles. Les têtes des filons ayant été enlevées par érosion, l'or est souvent resté intact parmi les alluvions. Ainsi se sont formés les gisements riches ou *placers* de Californie et d'Australie.

Dans le Gard, la venue de l'or est antérieure au terrain houiller, dont les conglomérats contiennent du quartz aurifère. Mais il y a eu aussi une venue d'or moderne, comme celle qui a formé au Nevada le célèbre filon dit *Comstock lode*.

Minerais de cuivre. — C'est aussi avec des roches basiques, surtout des *mélaphyres* ou des *diorites*, que les émanations de

cuivre se sont fait jour. Elles ont été particulièrement abondantes aux époques permienne et triasique, donnant naissance à des dépôts de sulfures (cuivre pyriteux, cuivre panaché), parfois d'arséniures et d'antimoniures (cuivre gris), transformés près de la surface en carbonates, carbonate bleu (azurite ou vert (malachite). Parfois les sels de cuivre se sont épanchés au milieu des sédiments contemporains, comme dans le Mansfeld, où le cuivre pyriteux, argentifère, imprègne un schiste bitumineux permien, riche en poissons, et dans le Var, où les carbonates de cuivre servent de ciment à un poudingue triasique.

Minerais de plomb argentifère et de zinc. — Les gisements de minerais de *plomb*, généralement *argentifères* et très souvent associés aux minerais de *zinc*, parfois à ceux de cuivre, réalisent par excellence le type des filons *concrétionnés* ou d'*incrustation* (fig. 152), c'est-à-dire formés par le dépôt régulier, sur les parois d'une fente, de bandes alternatives de gangues et de minerais, se répétant symétriquement à droite et à gauche.

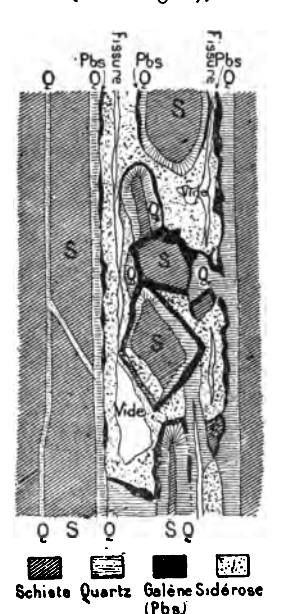


Fig. 152. — Échantillon d'un filon du Hartz, avec zones concrétionnées et fragments de schiste (d'après M. de Launay).

Les minerais sont : la *galène* ou sulfure de plomb, la *blende* ou sulfure de zinc, le *cuivre pyriteux* ou sulfure de fer et de cuivre, quelquefois l'*argent rouge*, combinaison de l'argent avec le soufre et l'antimoine ou l'arsenic. Les gangues dominantes sont le quartz, la calcite ou carbonate de chaux, le carbonate de fer, la barytine ou sulfate de baryte et quelquefois la fluorine ou fluorure de calcium.

Pour plusieurs filons plombifères, on a la preuve que

leur remplissage date du trias ou du lias inférieur.

Richesse des filons. Gîtes calaminaires. — Il s'en faut de beaucoup que la richesse d'un filon soit la même dans toutes ses parties. Les circonstances de cette distribution sont assez capricieuses, ce qui se comprend si l'on réfléchit à la nature des réactions multiples qui ont dû influencer le dépôt des minerais. On constate, dans bien des cas, un rapport étroit entre la richesse d'un filon et la qualité des roches qui forment les parois ou *épontes*. De la sorte, si un filon traverse successivement plusieurs terrains, sa richesse ne demeure pas constante. On se rend aisément compte de ce résultat en remarquant, d'abord que le mode de formation des fentes et leur bonne conservation, si nécessaire à la circulation des dissolutions métallifères, dépendent au plus haut degré de l'espèce des roches; ensuite que les réactions chimiques qui provoquent le dépôt des minerais ne peuvent manquer d'être influencées, soit par la composition, soit par l'état physique et la conductibilité des terrains encaissants.

Par exemple, lorsqu'un filon de blende passe d'un schiste dans un calcaire, il s'élargit brusquement et se change en un amas irrégulier, parfois très puissant, de carbonate et de silicate de zinc (*calamine*). Il est évident que les eaux, qui traversaient sans pouvoir l'attaquer la masse schisteuse, ont dissous et corrodé de proche en proche le calcaire, dont les fissures les mettaient en outre en contact avec des éléments oxydants. On donne le nom de *gîtes calaminaires* à ces filons élargis, dont il existe de beaux exemples à la Vieille-Montagne ainsi qu'au Laurium.

§ 2

PHÉNOMÈNES OROGÉNIQUES

Principe des phénomènes. — L'étude des périodes géologiques successives nous a montré qu'à bien des reprises, des modifications plus ou moins considérables s'étaient produites dans la distribution relative des terres et des mers. De tels changements accusent, de la part de l'écorce terrestre, une mobilité dont la cause semble facile à indiquer, si l'on accepte l'hypothèse de la masse ignée interne. En effet, avec

le temps, le noyau igné doit se contracter, parce qu'il perd de la chaleur et qu'une partie de sa substance est rejetée au dehors par les éruptions. Mais si épaisse que puisse être la croûte solide, il est vraisemblable qu'elle ne correspond qu'à une petite fraction du rayon terrestre, dont la longueur dépasse 6 000 kilomètres. Elle garde donc, dans l'ensemble, assez de flexibilité pour avoir besoin d'être soutenue, et lorsque son support vient à faiblir, il faut qu'elle se déforme en conséquence.

Allure générale des déformations. — Cette déformation, comme l'a indiqué Élie de Beaumont, doit être analogue à

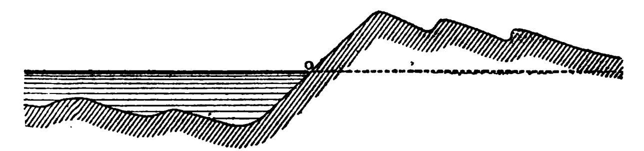


Fig. 153. — Allure générale des déformations de l'écorce.

celle qui se produit dans une étoffe primitivement bien tendue, et dont une cause quelconque diminue la tension.

Dans ce cas, l'excès d'ampleur détermine la formation d'un *rempli*, c'est-à-dire d'une juxtaposition de deux rides, l'une saillante, l'autre rentrante, dont la première tend à se renverser sur la seconde. Il y a donc à la fois *soulèvement* d'une partie de l'étoffe et *affaissement* de la portion immédiatement contiguë.

Telle paraît bien être, en effet, l'allure générale des dislocations terrestres. Presque partout on observe que les plus fortes lignes de relief, préparées par des ondulations successivement croissantes, occupent une situation littorale, regardant par leur flanc le plus abrupt une dépression océanique, qui reproduit la même disposition en sens inverse (fig. 153). Si donc les déformations de l'écorce résultent d'un mouvement général *centripète*, provoqué par la contraction progressive du noyau fluide, il n'en est pas moins vrai que les montagnes représentent des portions de l'écorce *soulevées* relativement au niveau moyen primitif, tandis que les

dépressions océaniques correspondent à des portions *affaissées*. Le tout résulte de mouvements *latéraux* de *refoulement*, qui peuvent avoir des *composantes* à la fois suivant l'*horizontale* et suivant la *verticale*, et dont les effets déterminent les traits principaux du relief terrestre, en premier lieu les *montagnes*, ce qui permet de les ranger sous la dénomination générale de *phénomènes orogéniques*. Chaque modification de ce relief influe sur le jeu des puissances extérieures; mais ces dernières se bornent à découper, d'une manière plus ou moins capricieuse, les parties de l'écorce que les mouvements orogéniques ont fait surgir en les disloquant.

Formes diverses des dislocations. — La tendance à la déformation, dont le principe vient d'être indiqué, produit des effets très différents, suivant l'état particulier des terrains qui en subissent l'influence. Les massifs d'ancienne consolidation, trop rigides pour se plisser, tels que les premiers îlots de terrain archéen, se brisent en compartiments limités par des *failles*, le long desquelles ces compartiments *jouent* les uns par rapport aux autres, comme on le voit dans le Morvan et le Plateau Central. Des systèmes épais de sédiments solides, lorsque le refoulement ne les pousse pas contre un noyau résistant, se soulèvent en masse (parfois en plusieurs parties limitées par des cassures ou de brusques inflexions) et font naître de hauts plateaux à stratification régulière, comme ceux où l'érosion a creusé les célèbres gorges ou *canyons* du Colorado. Si des assises sédimentaires relativement plastiques sont refoulées contre un obstacle rigide, comme l'ont été les couches secondaires et tertiaires du Jura contre le massif souterrain de terrain archéen qui relie le Plateau Central aux Vosges, elles se plissent en ondulations parallèles, les unes saillantes ou *anticlinales*, les autres rentrantes ou *synclinales*.

On a cru longtemps que la forme principale des dislocations orogéniques devait être celle de *plis anticlinaux* à peu près symétriques (fig. 154), de part et d'autre desquels les couches plongeaient en sens inverse, la surrection de l'axe du pli étant l'effet d'une impulsion verticale directe.

Mais on n'a pas tardé à reconnaître que, le plus souvent,

il y avait au moins dyssymétrie des versants (fig. 155), accusant une poussée *tangentielle*, et même que, dans bien des cas, cette poussée avait été assez forte pour incliner les deux



Fig. 154.

flancs du pli dans le même sens (fig. 156), de manière à engendrer ce qu'on appelle des *plis couchés* ou *isoclinaux*.

Ce cas est le plus fréquent dans les Alpes, où il a pour

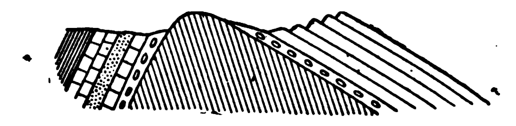


Fig. 155.

conséquence habituelle le laminage et l'amincissement de l'aile renversée ou *flanc inverse* du pli (fig. 157).

Parfois ce laminage va jusqu'à la suppression par rupture

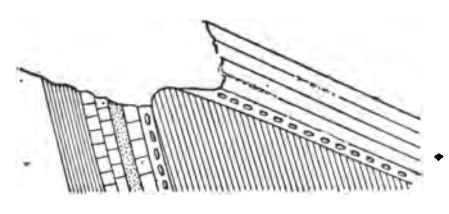


Fig. 156.

du flanc inverse, de sorte que le *flanc normal* ou direct, avec son support, se trouve poussé en montant le long de la surface de rupture ou *plan de charriage*. Et quand cet effet se répète plusieurs fois de suite, il en résulte ce qu'on appelle une structure *imbriquée* ou en *écailles*, qui semblent posées les unes sur les autres comme les tuiles d'un toit (fig. 158).

On dit alors que les différents paquets *chevauchent* les uns

sur les autres, par l'intermédiaire de ces plans de charriage ou *failles de chevauchement*, bien différentes de celles qui sont principalement dues à l'action de la pesanteur. En effet, dans ces dernières, quand la surface de rupture n'est pas absolument verticale, il y a descente le long de cette surface, ce qu'on exprime en disant que le *toit a glissé en descendant sur le mur* (revoir fig. 38 p. 135). Au contraire, dans les cas de plans de charriage, c'est le *toit qui a remonté sur le mur*, d'où le nom de *faille inverse* ou *faille de chevauchement*. Ces phénomènes prennent dans les Alpes un développement considérable.

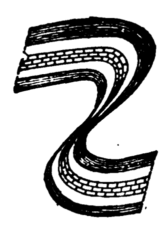


Fig. 157.

Notion des nappes alpines. — Le trait capital de la chaîne alpine est l'existence d'une série de plis, couchés jusqu'à l'horizontale, parfois même renversés, presque toujours vers

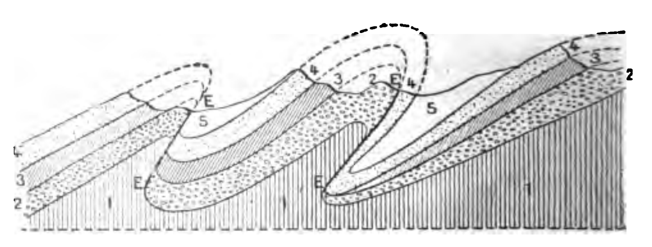


Fig. 158. — Exemple de structure imbriquée; E, E, failles d'étirement du flanc inverse.

le nord, et constituant comme autant de *nappes* superposées, dont chacune, venant du sud, a subi un transport capable d'atteindre de 80 à 100 kilomètres[1]. De la sorte, la tête de ces nappes, le plus souvent séparée de sa racine, et formée presque exclusivement par le flanc normal de l'ancien pli

1. La notion des nappes alpines, introduite par les travaux de MM. Marcel Bertrand, Suess, Schardt, Termier, Lugeon, a reçu de ce dernier savant son expression définitive.

(le laminage ayant fait disparaître le flanc inverse), apparaît, à la suite d'une longue érosion qui n'en a laissé subsister que des lambeaux, sous forme de *paquets*, dont la composition contraste étrangement avec celle de leur substratum actuel.

Chacune de ces nappes s'est avancée, vers le nord, un peu plus loin que la précédente, à la manière de vagues, qui

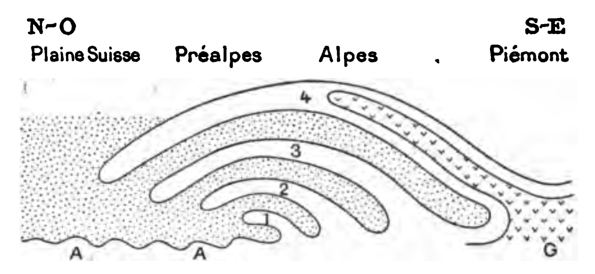


Fig. 159. — Schéma transversal de la superposition des nappes alpines. A, A, plis autochtones; 1, 2, nappes à racines externes; 3, 4, nappes à racines internes; G, gneiss de la bordure piémontaise.

déferlent les unes par-dessus les autres en arrivant sur un rivage. Leur disposition réciproque peut être exprimée par le schéma de la figure 159.

Le caractère commun à tous ces plis couchés est d'être noyés au sein du *flysch* oligocène, dans la masse duquel ils ont été poussés, et que l'érosion a plus ou moins décapé par la suite, ainsi que la mollasse, qui est venue le recouvrir après la mise en place des nappes. De celles-ci, les premières, telles que 1 et 2, ont leurs racines dans la partie *extérieure* de la chaîne, celle qui regarde le Jura, tandis que les dernières, telles que 3 et 4, ont leur racine dans la partie *intérieure* ou piémontaise. Les premières sont dites *nappes à racines externes*, et les autres, *nappes à racines internes*[1].

Distribution des facies dans les nappes. — Si l'on déve-

1. La figure ne représente que quatre nappes en tout; mais cela ne veut pas dire qu'on n'en puisse distinguer un plus grand nombre.

loppe par la pensée les sédiments de ces plis successifs, tels qu'ils devaient être avant la déformation des assises, on reconnaît que les couches des nappes externes doivent appartenir à une zone de sédimentation voisine de celle où se formaient les dépôts demeurés en place, et plissés ultérieurement *sans déplacement horizontal* sensible ; de sorte que la région AA, qui peut être appelée région des *plis autochtones*, représente le bord septentrional du bassin de sédimentation *helvétique*, dont la limite méridionale serait marquée par l'ancien emplacement du synclinal compris entre 2 et 3.

Ainsi les terrains des nappes externes ont le *facies helvétique*, caractérisé, en ce qui concerne le crétacique, par la présence du calcaire barrémien et aptien dit *Schrattenkalk*.

Au contraire, les sédiments des nappes externes, telles que 3 et 4, ont le facies *méditerranéen*, exprimé, par exemple, par la présence du trias fossilifère de type alpin. De plus, les nappes les plus internes, formées de sédiments qui, à l'origine, garnissaient le bord méridional du synclinal alpin, étant appliquées contre un substratum archéen, ont emporté avec elles, comme noyau anticlinal, des fragments plus ou moins complets de ce substratum. De la sorte, dans ces nappes, dites des *Alpes orientales*, se montrent, à travers le manteau plus ou moins discontinu de calcaire triasique, des masses de gneiss et même de granite, comme celles des Hohe Tauern.

Souvent d'ailleurs une nappe interne est interrompue par des lacunes dues à l'érosion, et ces lacunes constituent des *regards* ou *fenêtres*, laissant apparaître une nappe sous-jacente. Ainsi la fenêtre du Prættigau laisse voir la nappe des schistes lustrés sous celle du Rhætikon, et les mêmes schistes lustrés reparaissent, dans la Basse Engadine, à la faveur d'une fenêtre ouverte dans la nappe des Alpes orientales.

Localisation des diverses séries de nappes. Klippes. — C'est à partir du Chablais que se montrent les nappes charriées, et elles forment la totalité des Préalpes, jusques et y compris le Sentis, de sorte que le front autochtone de la chaîne est presque constamment couché sous les nappes de recouvrement.

De plus, si l'on suit la chaîne de l'ouest à l'est, on remarque

que toutes les nappes s'enfoncent régulièrement vers l'orient, conformément au schéma de la figure 160.

Les nappes des Alpes orientales ne commencent à se montrer qu'à partir du Rhætikon; les nappes inférieures à racines internes apparaissent dès le Chablais, accompagnées le long des Préalpes par un ruban de nappes à racines externes. Dans le Briançonnais, on ne voit plus que quelques lambeaux charriés, et, à la différence de ce qui se passe en Suisse, les chaînes subalpines, entre le Dauphiné et les Alpes maritimes,

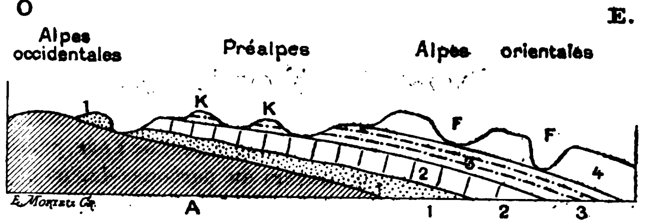


Fig. 160. — Schéma longitudinal de l'ensemble des nappes alpines. A, massifs autochtones; 1, 2 : nappes à racines externes; 3, 4, nappes à racines internes; K, K, klippes; F, F, fenêtres.

laissent exclusivement voir le front autochtone de la chaîne. Le relèvement de l'axe alpin, dans cette partie occidentale, a été assez considérable pour que l'érosion ait enlevé ce qu'il pouvait porter de nappes.

La plus basse des nappes internes apparaît souvent, dans les Préalpes romandes et allemandes, sous forme de lambeaux aujourd'hui isolés, qu'on appelle *Klippes* ou écueils, parce qu'ils surgissent au milieu du flysch environnant, aux formes toujours très douces, comme autant d'écueils escarpés et aux contours heurtés, qui sont formés de roches beaucoup plus anciennes que le flysch et inconnues dans le facies helvétique. Aussi les avait-on qualifiés dans l'origine de massifs *exotiques*. Les plus caractéristiques sont les montagnes des Mythen, près de Schwyz, et celles d'Iberg, où l'on trouve du trias fossilifère de type alpin.

Le phénomène des Klippes revêt une constance et une régularité remarquable dans les Carpathes, au nord des

monts Tatra, où les lambeaux de la nappe disloquée forment une multitude d'îlots surgissant à l'improviste au dessus d'un fond monotone de flysch. La dureté des roches qui les constituent, comparée à la facilité avec laquelle s'altèrent les dépôts du flysch encaissant, explique cette différence d'allure.

Rôle des anciens massifs. — La régularité de la superposition et de la juxtaposition des nappes alpines est troublée par endroits, à cause de l'existence, entre le côté interne et le côté externe de l'ancien synclinal alpin, de massifs anciens, de facies archéen, qui ont dû être consolidés de très bonne heure et jouer le rôle de môles résistants. Ces massifs, qui apparaissent aujourd'hui, au milieu des zones plissées encaissantes, comme des *amandes* au sein d'une pâte (d'où le nom de massifs *amygdaloïdes*), sont le Mercantour, le Pelvoux, la chaîne de Belledonne, le Mont-Blanc, le massif de l'Aar. Semés comme autant d'obstacles en travers du parcours des nappes issues de l'intérieur de la chaîne, ils ont parfois obligé ces dernières à *rebrousser chemin*, en donnant naissance à des plis déversés *vers le sud*. De là l'idée de la *structure en éventail*, longtemps considérée comme caractéristique des Alpes, alors qu'elle traduit seulement les *vagues en retour*, produites par la rencontre des anciens massifs résistants.

A l'extérieur de la zone des massifs amygdaloïdes se sont formés les dépôts des chaînes subalpines et ceux de facies helvétique, tandis qu'à l'intérieur les dépôts carbonifériens formaient une arête émergée. A cette arête succédait du côté italien le synclinal des schistes lustrés, bordé au sud par les dépôts pélagiques du trias et du jurassique.

Exemples de complications alpines. — Quelques-unes des complications de la chaîne alpine se révèlent du premier coup d'œil, même pour qui n'est pas géologue, à cause de la netteté avec laquelle s'aperçoivent, sur certains escarpements, les contournements des assises. C'est le cas du sommet de la Dent du Midi, et mieux encore des Dents de Morcles (fig. 161), où l'on voit, tout en haut, un lambeau, couché horizontalement, d'une nappe à racine externe, qui repose sur des couches triasiques et jurassiques, dont les plis sont enracinés dans un substratum carboniférien. Ce substratum lui-même

a été plissé longtemps auparavant et se trouve logé au sein de schistes anciens, ceux-ci en plis aigus et fortement redressés par un mouvement de date encore plus lointaine.

Parfois, dans de tels accidents, le désordre de la stratification est tel, que la tâche du stratigraphe devient aussi ardue que le serait celle d'un architecte, chargé de définir la situation originelle des matériaux d'un édifice effondré, et cela après qu'on en aurait déjà enlevé la plus grande partie.

Phases du soulèvement des Alpes. — Nous avons dit que

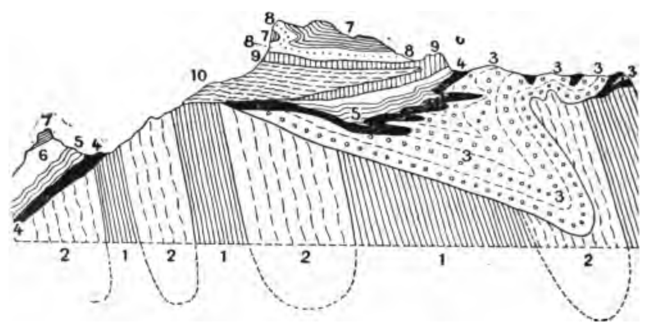


Fig. 161. — Coupe des dents de Morcles, d'après MM. Renevier et Golliez. Échelle du 100000e. — 1, schistes micacés; 2, schistes verts (cornes); 3, carboniférien; 4, trias; 5, lias et mésojurassique; 6, néojurassique; 7, néocomien; 8, barrémien; 9, nummulitique; flysch.

les nappes avaient cheminé *dans le flysch*, sans que la mollasse, déposée plus tard, ait participé à leur mise en place. Il en résulte que le phénomène des plis couchés a dû s'accomplir vers la fin de l'époque oligocène. Pendant de longues périodes, la sédimentation s'était exercée dans une grande fosse synclinale, marquant à peu près le parcours des Alpes actuelles, et s'approfondissant à mesure qu'elle se comblait, sans doute parce qu'elle représentait une partie faible de l'écorce terrestre.

Après l'oligocène, la faiblesse de ce sillon s'est accentuée de telle sorte, que son bord méridional a été refoulé contre l'autre. Si les sédiments ainsi poussés n'avaient eu qu'un faible poids à supporter, ils se seraient courbés en larges

voûtes; mais subissant cette pression à une profondeur qui suffisait à les rendre plastiques, et comprimés par tout le poids des couches superposées, y compris de flysch, ils ont dû se tordre en plis couchés vers le nord.

Plus tard, la mollasse est revenue occuper la fosse préalpine, en avant d'un premier relief déjà dessiné, aux dépens duquel les grès et poudingues miocènes se sont formés. Alors s'est produite, à l'époque tortonienne, la surrection en bloc du massif disloqué, à plusieurs milliers de mètres au-dessus de son niveau primitif. En même temps que cette surrection rejetait la mollasse à l'extérieur en la plissant violemment, elle exposait les nappes, mises à découvert, à l'action des agents atmosphériques, laquelle, guidée par la résistance et l'orientation des roches ainsi mises à nu, y a découpé les crêtes et les gorges des Alpes actuelles. Mais ces crêtes et ces gorges n'étaient pas dessinées dès l'origine du plissement, qui n'a dû se traduire au dehors que par une surface à larges ondulations.

Ainsi, au lieu de s'être produit d'un seul coup à l'époque tortonienne, comme on l'a longtemps cru, le soulèvement alpin est au moins l'œuvre de deux mouvements successifs : l'un, de date oligocène ou post-oligocène, qui a engendré *en profondeur* les grands plis couchés, en les charriant dans la masse du flysch; l'autre, de date tortonienne, qui a consisté surtout dans un soulèvement en bloc d'un massif antérieurement disloqué. Il est d'ailleurs certain que ces deux mouvements ont dû être précédés de beaucoup d'autres, à travers les périodes qui se sont écoulées depuis le carboniférien jusqu'au tertiaire.

Anciennes dislocations de type alpin. — L'histoire de la chaîne alpine, avec son prolongement carpathique, paraît avoir été aussi celle de toutes les dislocations qui jalonnent la grande dépression intercontinentale. Serrée entre l'Eurasie, d'un côté, l'Indo-Afrique de l'autre, comme entre les deux mâchoires d'un étau, cette dépression a toujours abrité des synclinaux qui, après s'être remplis de dépôts, ont surgi sous la forme de chaînes plissées.

C'est notamment ce qui avait eu lieu, à la fin de l'époque

westphalienne, pour la région située entre l'Armorique et la Bohême, lorsqu'à la place des anciens synclinaux houillers se dressa la chaîne *hercynienne* (dite aussi *armoricaine varisque*). Là aussi, le bord méridional du synclinal carboniférien, poussé contre l'autre, dut remonter le long d'une surface de charriage, engendrant l'accident bien connu dans les bassins du nord sous le nom de *faille du midi* ou *faille eifélienne*.

Ainsi s'expliquent des coupes comme celle de la figure 162, qui a été relevée, dans le bassin de Charleroi, aux environs de Landelies. Non seulement le dévonien renversé (désigné par le numéro 1), y surplombe le terrain houiller (4) et le calcaire carbonifère (3). Mais, un peu plus au nord, un nouveau paquet de terrains renversés (2, 3, 4) vient se superposer au terrain houiller en place (4 et 5 à droite de la figure), non sans avoir été lui-même disloqué par plusieurs failles successives.

A l'endroit où la faille du Midi vient rencontrer la surface, on aperçoit un fragment de calcaire carbonifère, pincé entre le dévonien et le houiller en place. C'est un *lambeau de poussée*, arraché au calcaire de la charnière (3) et entraîné lors du glissement du *massif de recouvrement* dévonien (1).

Fig. 162. — Coupe dans le bassin de Charleroi (d'après M. Briart).

On a conclu de cette coupe, avec pleine apparence de raison, que le paquet septentrional était la suite d'un pli disloqué, se rattachant à l'accident de la faille du midi, et qu'ainsi le schéma général du bassin houiller franco-belge

pouvait s'établir conformément à la figure 163. C'est-à-dire qu'une première poussée latérale ayant produit côte à côte, à droite un pli synclinal, celui qui est désigné sous le nom de *cuvette houillère*, et à gauche un pli anticlinal, cet ensemble, sous l'influence de la pression, venant de la gauche, s'est renversé de façon à devenir sensiblement horizontal, de vertical qu'il était au début. Ensuite le flanc inverse du pli anticlinal, toujours poussé vers la droite, a été laminé et étiré de telle sorte, que sa partie supérieure, se détachant de son origine et cheminant avec la charnière anticlinale, s'est

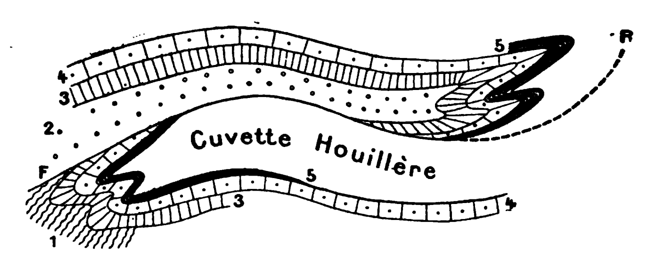


Fig. 163. — Schéma de l'accident du bassin houiller franco-belge (d'après M. Marcel Bertrand). — 1, silurien: 2, dévonien inférieur ; 3, dévonien supérieur ; 4, calcaire carbonifère ; 5, schistes houillers. F, grande faille, R, cran de retour.

avancée le long d'une surface de poussée FR. De cette surface, la partie voisine de F constitue la *faille du midi*, tandis que la portion qui touche à R est ce que les mineurs appellent *cran de retour*, c'est-à-dire un accident, jusqu'alors inexpliqué, qui met en contact deux fractions de terrain houiller, l'une, celle du bas, en place, l'autre, *charriée* par-dessus la première après le plissement et le renversement de celle-ci.

Plus tard, l'érosion a enlevé, suivant les points, une portion plus ou moins forte du *paquet de recouvrement* de la cuvette houillère; et ainsi seraient nées les circonstances propres aux diverses parties du bassin, depuis Charleroi jusqu'au Boulonnais.

Dislocations de la Cordillère américaine. — A côté du type alpin des montagnes de plissement, caractérisé par

l'énergie des refoulements et l'ampleur des phénomènes de chevauchement, il en est d'autres, comme celui qui trouve sa réalisation dans la grande Cordillère américaine, en bordure du Pacifique.

En dehors de sa partie septentrionale, cette chaîne n'offre que des plis assez réguliers, peu pressés, et exempts de nappes charriées. En revanche, tandis que la chaîne des Alpes est remarquablement pauvre en manifestations éruptives contemporaines de sa formation, toute la chaîne des Andes abonde en *tufs andésitiques* (*porphyritiques*), qui se sont formés depuis le début des temps jurassiques jusqu'à nos jours. Ces tufs attestent l'ancienneté du phénomène éruptif qui se signale encore, tout le long de la Cordillère, par le nombre et l'importance des appareils volcaniques.

Ainsi, tandis que le type alpin correspondrait aux mouvements d'une fosse synclinale toujours serrée entre deux massifs rigides, on peut penser que le type des Andes conviendrait au contour de la grande dislocation qui, dès les premiers temps, a déterminé l'affaissement de l'une des moitiés de la calotte terrestre et son occupation par les eaux du Pacifique. Et comme la séparation des deux moitiés a dû s'accomplir suivant une ligne de rupture, on conçoit que cette dernière ait toujours offert une issue privilégiée aux produits de l'énergie interne du globe.

Les dislocations de la Cordillère revêtent une netteté particulière dans la région côtière de la Californie. Au pied de la Sierra Nevada s'étend, à l'ouest, une dépression où coulent, exactement en sens inverse, les deux rivières de San Juan et de San Joaquin. Cette dépression est séparée du littoral par les chaînes côtières, que l'émissaire des deux cours d'eau franchit à angle droit, engendrant la baie si découpée de San Francisco, qui trahit une succession de rides et de vallées parallèles à la côte. De la Punta Arena jusqu'au Mont Pinos s'étend, sur 600 kilomètres, une dislocation linéaire jalonnée par des accidents caractéristiques, et dont la moitié septentrionale a été le siège du tremblement de terre du 18 avril 1906. A cette occasion les deux lèvres de la cassure ont été affectées d'un mouvement différentiel manifeste.

Effondrements. — Au nombre des accidents qui peuvent survenir dans l'écorce, il faut comprendre les grands *effondrements*, tels que celui qui a fait naître la vallée du Rhin, ou celui qui a donné naissance à la mer Morte. Mais il convient de remarquer que la plupart de ces accidents résultent de la chute d'un compartiment de l'écorce, situé précisément *à la clef d'une voûte* en voie de formation. Ainsi les Vosges et la Forêt Noire constituaient un massif homogène soulevé en masse, et dont la partie culminante s'est rompue sous l'effort qu'elle subissait, laissant s'écrouler un *voussoir*, dont la chute a fait naître la vallée du Rhin. De même, la mer Morte occupe l'emplacement d'une faille très nette, survenue au sommet d'un pli *anticlinal* remarquablement rectiligne, qui comprend avec cette mer la vallée du Jourdain. La faille se poursuit en se coudant par les coupures du Wadi-Arabah et du golfe d'Akaba et atteint la mer Rouge, dont elle détermine l'alignement jusqu'à Massouah, pour se continuer ensuite sous la forme d'une falaise qui fait la limite orientale de l'Abyssinie et que prolonge, jusqu'à Zanzibar, une ligne de fracture où s'échelonnent d'immenses cônes volcaniques. Ainsi les effondrements alignés rentrent dans la formule générale du phénomène orogénique. Chacun d'eux indique un *maximum de tension*, que l'écorce solide n'a pu supporter sans se rompre, en laissant s'écrouler le sommet de la voûte rompue.

D'autres effrondements sont ceux qui se produisent à la suite d'un grand effort orogénique, et comme contre-partie d'un soulèvement qui aurait, en quelque sorte, dépassé la mesure. C'est ainsi qu'après l'époque tortonienne, presque toute la région méditerranéenne s'était laissé entraîner dans les airs par la surrection de la chaîne alpine. Mais alors des tassements se sont produits, et une suite d'effondrements, progressant de l'ouest à l'est, ont constitué tour à tour la fosse tyrrhénienne, la fosse adriatique, la fosse sicilienne, enfin la mer Égée. Tous ces effondrements étaient limités par des cassures, où s'installaient immédiatement des volcans. Ainsi le Vésuve, les îles Lipari et l'Etna jalonnent la cassure qui définit le compartiment tyrrhénien effondré. L'équilibre de ces compartiments est d'ailleurs de temps en

temps exposé à quelques troubles, ce qui explique la fréquence et la gravité des tremblements de terre dans les régions méditerranéennes.

Signification des directions, influence du substratum. — L'effort de refoulement vient, en général, d'une *direction* déterminée, et tend à se traduire par des accidents *parallèles*. Mais son effet dépend nécessairement aussi de la forme des massifs résistants contre lesquels les plis s'accumulent et, à la rencontre d'un obstacle, la direction des plis peut être sensiblement infléchie. C'est ainsi que les plis du Jura, dirigés du sud au nord dans la partie méridionale, parce que tel est l'alignement du bord oriental du Plateau Central, se courbent progressivement au nord-est en Franche-Comté, conformément au parcours du massif souterrain dont l'îlot gneissique de la Serre atteste l'existence, pour prendre ensuite, le long du bord méridional des Vosges et de la Forêt Noire, une direction est-ouest, bien nette dans le dernier chaînon, celui des Lägern. Si donc les alignements des chaînons présentent, dans l'étude des montagnes, une incontestable importance, il ne faut pas oublier, d'une part, que des directions multiples peuvent correspondre à un même effort; d'autre part, qu'une même direction peut se reproduire à des époques différentes.

Il faut observer aussi que la plasticité d'un ensemble d'assises, affectées par un refoulement, dépend à un certain degré de leurs relations avec un substratum rigide. Ainsi, dans le Jura, les plis sont nombreux et réguliers du côté suisse, engendrant le *Jura plissé*, parce que la série des sédiments y est épaisse et que leur soubassement rigide est lointain. Mais dès qu'on approche, soit de la Forêt-Noire, soit du môle souterrain qui prolonge les Vosges au sud-ouest, les plis font place à un système de cassures et de failles limitant de grands blocs, régime caractéristique du *Jura tabulaire* au *plateau jurassien*. De plus, à la rencontre des deux territoires, il arrive souvent que la poussée oblige le bord des chaînes plissées à chevaucher par-dessus la région tabulaire. Parfois, non loin de Bâle, le trias et le jurassique inférieur en viennent à se superposer au tertiaire.

Les derniers mouvements de l'écorce paraissent avoir eu pour effet la production de fractures nord-sud, comme celles qui ont ouvert les deux extrémités de l'Atlantique ou créé les dépressions de la mer Rouge, du Jourdain et des lacs africains. C'est ainsi qu'à l'ordonnance des anciens âges, qui comportait deux continents allongés *de l'ouest à l'est*, l'un boréal. de l'Alaska à la Sibérie, l'autre tropical, des Andes chiliennes à l'Australie, s'est substituée peu à peu l'ordonnance actuelle, où s'accuse la tendance à l'allongement *du nord au sud* dans les unités continentales

---

CHAPITRE XI

CONSIDÉRATIONS GÉOGÉNIQUES

§ 1

CAUSES DES VARIATIONS DE LA CHALEUR EXTERNE

Principe du phénomène paléothermal. — La conception de la fluidité primitive de notre planète, entraînant comme conséquence la conservation, jusqu'à nos jours, d'une masse ignée interne, explique d'une manière satisfaisante, avec la forme actuelle du globe, la constitution de l'écorce ainsi que le jeu des phénomènes éruptifs et orogéniques. Mais il est une chose dont cette hypothèse ne suffit pas à rendre compte, c'est l'uniformité climatérique des premiers âges géologiques.

S'il est un fait que la paléontologie, et spécialement la branche de cette science qui s'occupe du monde végétal, ait bien mis en évidence, c'est assurément la diminution progressive de la chaleur dans les hautes latitudes de notre globe. Nous avons vu que, pendant toute la durée des temps pri-

maires, un climat semblable à celui des tropiques paraissait avoir régné depuis l'équateur jusqu'aux pôles, et c'est à peine si, vers la moitié de l'ère secondaire, a commencé à se manifester le rétrécissement progressif de la zone tropicale. Au début de l'ère tertiaire, le Groenland nourrissait encore une végétation semblable à celle qui, de nos jours, caractérise la Louisiane, et les mêmes plantes florissaient au Spitzberg, ainsi que dans la presqu'île d'Alaska. L'apparition des glaces polaires a donc été très tardive, et l'on peut presque la considérer comme ayant mis fin aux temps géologiques proprement dits, pour inaugurer l'ère actuelle.

D'autre part, une augmentation de la chaleur solaire dans le passé ne saurait rendre compte du privilège dont les hautes latitudes ont si longtemps joui; car l'équateur en aurait eu sa part et cette exagération de température eût certainement rendu la vie impossible dans son voisinage. Or dans quelques latitudes qu'on descende, la paléontologie nous montre des espèces, fougères et cycadées, qui sont loin d'exiger un degré de chaleur supérieur à celui de la zone torride actuelle. En outre, les plus anciennes, les fougères, sont des plantes qui recherchent l'ombre, et les premiers insectes dont on ait observé les restes appartiennent à des familles qui aujourd'hui vivent de préférence dans les lieux obscurs. Ce n'est donc *ni par un excès de chaleur ni par un excès de lumière* que se caractérise ce qu'on a justement appelé le *phénomène paléothermal.* C'est par une *répartition uniforme de la chaleur des tropiques*, s'étendant, sans variations sensibles, d'une extrémité à l'autre du globe. Trouver la cause de cette uniformité, si contraire à la distribution actuelle des climats, tel est le problème qu'il s'agit de résoudre.

Insuffisance des causes géographiques. — Un tel fait peut-il être expliqué par le changement des conditions géographiques? Nous ne pensons pas qu'il soit possible de le soutenir. Assurément nous reconnaissons quelle influence exercent, sur les climats, la disposition réciproque des terres et des mers, la situation tropicale ou tempérée des continents, la prédominance, plus ou moins marquée en chaque

point, de l'élément liquide, enfin la valeur du relief. Si donc il s'agissait d'expliquer des faits locaux, nous admettrions volontiers que la chaleur eût varié, en tel ou tel point, par suite d'une modification survenue dans l'altitude, dans l'exposition ou dans le parcours des courants marins. La suppression du *Gulf Stream*, par exemple, apparaîtrait comme une cause suffisante pour produire, dans l'Atlantique nord, une notable diminution de la température.

Mais des changements de ce genre n'agiraient pas sur tout le globe terrestre à la fois et, la chaleur totale que verse le soleil restant la même, elle serait seulement répartie d'une façon différente. Jamais des modifications de cette nature n'empêcheraient qu'il y eût, sur le globe, une zone torride et une zone glaciale, et, de quelque façon qu'on distribue par la pensée les terres et les mers, il sera toujours impossible de produire, sur la surface de la terre, cette égalité absolue de température, indépendante de la latitude, qu'atteste l'examen de la flore houillère.

Stabilité de l'axe terrestre. — Quant à la ressource, souvent invoquée, qui consisterait dans un déplacement de l'axe terrestre, capable de faire profiter successivement toutes les parties du globe de la chaleur équatoriale, cette conception, admissible en principe, se heurte à d'insurmontables difficultés de fait. En premier lieu, ceux qui ont abordé la question par le calcul ont établi que, pour déplacer l'axe des pôles d'une simple fraction de degré, il faudrait, dans le relief du globe, des modifications incomparablement plus grandes que celles qui ont pu accompagner la production des plus hautes chaînes de montagnes. De plus, aussi loin que nous conduise la botanique fossile, qu'il s'agisse du miocène ou de la période jurassique, les zones de végétation, déjà dessinées ou esquissées, semblent concentriques au pôle actuel, comme si sa position n'avait jamais varié d'une manière sensible.

D'ailleurs, un déplacement du pôle ne ferait que transporter à de nouvelles régions le bénéfice des conditions climatériques de la zone tropicale, et ne pourrait jamais produire l'uniformité que nous avons signalée comme la caractéristique des premiers âges.

Insuffisance de la chaleur interne. — Laissant donc de côté l'axe terrestre, il faut chercher dans une cause agissant partout à la fois le principe de l'uniformité signalée. Cette cause, plusieurs ont cru la trouver dans le rayonnement de la chaleur interne, à laquelle une moindre épaisseur de l'écorce eût permis, dans les temps paléozoïques, de contribuer efficacement à la température de l'atmosphère. Mais cette hypothèse ne résiste pas à l'examen. Partout où le terrain de gneiss et de micaschistes se montre au jour, c'est par milliers de mètres que se compte son épaisseur, et dès lors il est évident qu'aux époques paléozoïques, une écorce de plusieurs kilomètres protégeait déjà la chaleur centrale contre la déperdition. Or pour qui connaît la mauvaise conductibilité des roches, c'est plus qu'il n'en faut pour réduire à presque rien l'apport extérieur du foyer interne.

Pour produire une température corallienne, c'est-à-dire une moyenne de + 20° au moins, dans des parages où règne aujourd'hui une moyenne de — 15° à — 20°, il faudrait, à travers l'écorce, un flux de chaleur capable d'augmenter de 40° la température extérieure. Or une telle addition, qui devrait avoir lieu aussi dans les régions tropicales, suffirait pour y mettre à néant toute activité physiologique, et la mer deviendrait inhabitable pour tout organisme tant soit peu élevé. Enfin ce n'est pas seulement de chaleur, c'est aussi de lumière que les végétaux tertiaires du Groenland avaient besoin, et l'hypothèse que nous examinons n'y pourvoit à aucun degré.

Causes astronomiques. — Si les causes propres au globe terrestre se montrent impuissantes à produire le résultat cherché, c'est qu'alors il en faut chercher le principe en dehors de la terre, dans quelque facteur astronomique. Le premier auquel on ait songé est la variation de l'excentricité de l'écliptique, combinée avec celle qu'entraîne la précession des équinoxes.

Mais la seule vertu d'une influence de ce genre serait de produire des saisons extrêmes, en même temps qu'une différence considérable entre les deux hémisphères, et, plus que toute autre encore, une telle disposition serait impropre à

réaliser l'uniformité thermique des temps paléozoïques.

Hypothèse de la concentration du soleil. — Bien différente est, à nos yeux, la valeur d'une conception, introduite dans la science par M. Blandet, et qui a pour base la diminution du diamètre apparent du soleil. Nous avons pris soin de faire remarquer que la distribution actuelle des climats avait pour principe essentiel, avec l'inclinaison de l'axe terrestre, *le parallélisme des rayons solaires*. En raison de la grande distance qui nous sépare de l'astre et de la faible amplitude angulaire sous laquelle son disque s'offre à nous, malgré ses énormes dimensions, les rayons du soleil forment un faisceau cylindrique, qui touche la terre suivant un grand cercle. Mais il en serait tout autrement si le soleil était plus dilaté, car ses rayons seraient plongeants et enveloppants, supprimant la nuit totale des régions polaires. Sans doute un soleil ainsi dilaté serait plus ou moins nébuleux et donnerait, par chaque unité de sa surface, une chaleur et une lumière moins intenses; mais la terre, étant bien plus rapprochée de la périphérie de cette nébuleuse et se trouvant comme baignée dans son atmosphère, en pourrait profiter dans la même mesure qu'aujourd'hui et ainsi, pour une valeur convenable du diamètre apparent de l'astre principal, le globe jouirait d'une complète uniformité de climats.

Entretien de l'énergie solaire par la concentration. — Or cette conception, qui a pu, lors de son apparition, déconcerter les esprits accoutumés au principe de la stabilité des éléments astronomiques de notre système planétaire, nous semble en accord formel avec l'idée qu'on doit se faire de la genèse de ce système. Dans l'hypothèse si plausible de la nébuleuse primitive, la terre est un fragment infiniment petit, détaché de l'astre central à l'une des époques de sa condensation progressive, et pour lequel, en raison de ses faibles dimensions, la phase stellaire a dû être extrêmement courte. Au contraire, l'énorme masse du soleil et, mieux encore, le rétrécissement graduel de ses dimensions, lui ont permis de garder, malgré le rayonnement, une provision d'énergie considérable, qui, après tant de siècles écoulés, suffit encore aux besoins extérieurs de notre globe. En dehors de cette concep-

tion, le maintien de la chaleur solaire est absolument inexplicable. En vain prétendrait-on l'alimenter par une pluie continuelle de météorites. Non seulement la réserve en serait bien vite épuisée; mais les astronomes ont démontré que la masse du soleil en recevrait assez d'accroissement pour que les conditions du système planétaire fussent rapidement modifiées. Une seule cause, en vertu des lois de la thermodynamique, est capable de préserver l'énergie solaire sans faire appel au concours si insuffisant du dehors, c'est le phénomène de la condensation de l'astre. Par là, le pouvoir calorifique du soleil peut se maintenir sans perte sensible, à l'aide d'une diminution de diamètre apparent, qui demanderait plusieurs milliers d'années pour pouvoir être enregistrée par nos appareils les plus délicats.

Mais si, de nos jours, le soleil, réduit comme il l'est, subit encore ce mouvement de concentration nécessaire à l'entretien de son énergie, combien ne faut-il pas qu'à d'autres époques ses dimensions aient été différentes de ce qu'elles sont aujourd'hui? Rien n'est donc plus logique que cette hypothèse et puisque, irréprochable au point de vue de l'astronomie, elle fournit seule le moyen d'expliquer le phénomène paléothermal, nous ne croyons pouvoir mieux faire que de l'accepter, en affirmant, contrairement aux doctrines de l'école *uniformitaire*, que l'histoire ancienne de notre planète s'est déroulée au milieu de conditions extérieures très différentes de celles qui nous entourent. En particulier, la formation de l'astre central, considéré comme une individualité distincte, a été certainement tardive.

§ 2

RÉSUMÉ COSMOGONIQUE

S'il reste encore en géologie plus d'un point obscur, néanmoins l'ensemble des faits définitivement acquis à la science est aujourd'hui assez considérable pour qu'on puisse, sans grande témérité, essayer de les grouper en une synthèse générale. C'est ce que nous allons faire, à titre de résumé

des observations et des hypothèses que nous avons eu occasion de formuler dans le cours de cet ouvrage.

L'étude des manifestations de la dynamique terrestre nous a montré qu'en réalité il n'y avait partout que deux puissances en jeu : d'une part, la gravité ou attraction centripète; de l'autre, la chaleur, ou principe centrifuge, chaleur externe ayant sa source dans le soleil, chaleur interne emmagasinée dans les profondeurs du globe. Or ces deux éléments peuvent se réduire à un principe unique, si l'on suppose qu'à l'origine toute l'énergie de notre système planétaire ait été renfermée dans une nébuleuse, c'est-à-dire dans un amas très dilaté de matière vibrante et lumineuse, animée d'un double mouvement de rotation et de concentration centripète. Dans ce cas, à la lumière de la thermodynamique, le mouvement de concentration nous apparaît comme une conséquence de la grande loi de la *conservation de l'énergie*, car c'est à la faveur de cette condensation qu'un système défend la provision qu'il possède contre la déperdition extérieure.

Admettant donc la conception de la nébuleuse primitive, on est conduit à diviser l'histoire terrestre en deux phases, de durées sans doute très inégales : une phase *stellaire*, très courte, pendant laquelle le globe, détaché de la nébuleuse solaire, s'est condensé, puis refroidi, jusqu'à ce que sa surface fût recouverte d'une écorce obscure; et une phase *planétaire*, qui se poursuit encore et qui est la seule dont la géologie ait à s'occuper. Le rôle de cette science commence au passage de la première phase à la seconde, alors que la réaction des fluides extérieurs sur l'enveloppe superficielle du globe va produire, dans des conditions encore mystérieuses de pression, de température et de milieu chimique, cet assemblage de couches cristallines qui forme le *terrain archéen*.

A partir de ce moment, l'activité des éléments matériels a subi sur le globe un partage définitif. Tandis que l'énergie intérieure, concentrée sous l'écorce, devait se manifester au dehors plutôt par saccades que d'une manière continue, par les dislocations de la croûte terrestre, l'énergie extérieure, ayant son principe dans l'action du soleil, combinée avec celle de la pesanteur, était destinée à subir une évolution

continue par elle-même. Mais assujettie à ressentir le contrecoup des variations plus ou moins brusques de l'activité interne, cette évolution allait, elle aussi, progresser d'une manière inégale, recevant, de temps à autre, une impulsion nouvelle des phénomènes produits sous l'empire de causes profondes.

En premier lieu, l'écorce originelle, peu épaisse et mal soutenue, a dû chercher son assiette jusqu'à ce que les premiers linéaments de la géographie du globe eussent été définis. C'est alors que sont dessinées à sa surface les zones faibles et les zones résistantes, ces dernières, sous forme d'îlots, constituant les premiers noyaux de l'*aride* ou des continents, tandis que, dans les dépressions, s'accumulait l'élément liquide, à peine partagé en océans distincts.

Ce premier acte une fois accompli, la vie a pris possession du globe, non, à ce qu'il semble, d'une façon progressive et par une lente évolution d'organismes inférieurs, mais, autant qu'on en puisse juger, par l'apparition presque immédiate de types possédant toute la perfection que comportaient les circonstances ambiantes. De plus, ces types étaient les mêmes sur toute la surface terrestre, et si, pour les organismes marins, cette similitude s'explique, à la rigueur, par l'immense étendue et la libre communication de toutes les mers, du moins le caractère des premières flores continentales nous oblige à admettre une répartition de la chaleur et de la lumière tout autre que celle qui prévaut aujourd'hui. On a vu qu'à nos yeux cette répartition, produisant l'égalité absolue des climats, exigeait un soleil nébuleux et très dilaté.

Les débuts de la vie continentale ont été caractérisés par le règne à peu près exclusif de végétaux dont rien ne contrariait la croissance, se développant, par une température simplement tropicale, au sein d'une atmosphère humide, sans doute chargée de nuages, qui ne laissaient arriver à la terre que des rayons diffus. Les seuls animaux terrestres que cette végétation ait abrités sont de ceux dont les congénères actuels recherchent l'ombre, et l'éclat de couleurs qui fait aujourd'hui le charme de la nature n'avait à cette époque aucune raison de se manifester.

En revanche, sous l'action d'un régime particulier de pluies torrentielles, cette puissante végétation, au lieu de voir ses débris se décomposer sans profit à l'air libre, était entraînée au fur et à mesure dans des lacs ou des lagunes maritimes. Là, sous la protection de sédiments argileux, elle devait subir, presque sans perte de substance, une compression lente, devenant de la houille, où l'homme saurait un jour retrouver, immédiatement disponible, l'énergie calorifique et lumineuse dépensée par la nébuleuse solaire durant cette remarquable époque.

Mais l'atmosphère se purifiait par le fait même de cette végétation et de son enfouissement. Les animaux terrestres apparurent, représentés par des reptiles. L'énergie intérieure, qui s'était déjà traduite, à bien des reprises, par des éruptions profondes et des projections, aboutit à une sorte de paroxysme, qui produisit les grands épanchements houillers et permiens; après quoi, le calme vint, et d'abondantes émanations, suite naturelle des éruptions, tapissèrent de minéraux divers les fentes ouvertes dans l'écorce.

Durant cette ère de paix, où le travail mécanique de la sédimentation était faible, les organismes purent s'employer, sur une échelle notable, à l'accroissement de l'écorce. C'est pendant cette période que, sur la végétation terrestre, se manifestent les premiers signes d'une différenciation, c'est-à-dire d'une individualisation mieux marquée de l'astre central. Mais cette transformation est lente à se produire et, longtemps encore, les pôles vont jouir d'une température clémente. Pour que ce privilège leur soit enlevé, il faudra que, de nouveau, l'activité intérieure se réveille et, faisant émerger de grandes masses continentales, imprime à l'écorce, par une série de soubresauts successifs, ces mouvements qui porteront dans les airs les Pyrénées, les Alpes et autres grandes chaînes de montagnes. Sur le globe, enfin pourvu d'un relief qui longtemps lui avait fait défaut, les mammifères, frappés, on peut le dire, depuis leur première apparition, d'une sorte d'arrêt de développement, vont s'épanouir et se multiplier, jusqu'à ce qu'ils trouvent leur suprême expansion dans les gigantesques proboscidiens du miocène

supérieur et du pliocène. A la faveur de la variété des conditions externes, la végétation revêt une ampleur et une diversité de formes jusqu'alors inconnues, et fournit partout aux herbivores une abondante nourriture.

Cependant la condensation du soleil se poursuit et, avec elle, le refroidissement des extrémités polaires. A ce moment, alors que le soulèvement des grandes chaînes vient d'élever dans les hautes régions de puissants instruments de condensation, un ensemble de circonstances que nous avons cherché à expliquer imprime, dans des latitudes tempérées, une activité extraordinaire aux précipitations atmosphériques. C'est l'ère des glaciers et des grands cours d'eau, où les vallées se déblayent, où les fertiles alluvions se déposent, où les torrents, faisant l'office de pionniers et de mineurs, non seulement rendent les montagnes accessibles jusqu'à leur centre, mais stratifient, à la base de leurs déjections, les métaux précieux arrachés au quartz des filons. L'homme peut venir : la terre est mûre pour le recevoir! c'est à lui désormais de reconnaître et de mettre à profit toutes ces richesses, si libéralement accumulées pour ses besoins, avec une prévoyance qui rend d'autant plus étroit pour lui le devoir d'en bien user.

ÈRES	PÉRIODES	ÉLÉMENTS ORGANIQUES CARACTÉRISTIQUES			DISLOCATIONS
		VERTÉBRÉS	*INVERTÉBRÉS*	*VÉGÉTAUX*	
	ARCHÉENNE				Première ébauche des continents. Plis huroniens.
PRIMAIRE	*PRECAMBRIENNE*				Plissements du massif calédonien et des Ardennes.
	SILURIENNE		*RÈGNE DES TRILOBITES*		
	DÉVONIENNE	*REGNE DES POISSONS*		*RÈGNE DES ACROGÈNES ET DES GYMNOSPERMES*	
	CARBONIFÉRIENNE	*RÈGNE DES LABYRINTHODONTES*			Ridement du Hainaut. Plis hercyniens.
	PERMIENNE		*PREMIERS AMMONITIDÉS*		
SECONDAIRE (in part.).	*TRIASIQUE*	*PREMIER ÉPANOUISSEMENT DES REPTILES*			Failles du Morvan.
	JURASSIQUE — *SÉRIE LIASIQUE*	*RÈGNE DES SAURIENS*	*RÈGNE DES AMMONITES DES BELEMNITES ET DES BRACHIOPODES*	*RÈGNE DES CYCADÉES*	Invasion marine dans le golfe anglo-parisien.
	JURASSIQUE — *SERIE MÉSO-JURASSIQUE*				Émersion progressive du bassin anglo-parisien.
	JURASSIQUE — *SERIE NÉO-JURASSIQUE*			*PREMIÈRES ANGIOSPERMES*	

SECONDAIRE (in p.)	CRÉTACIQUE	*SÉRIE ÉOCRÉTACIQUE*	*RÈGNE DES DINOSAURIENS*	*CÉPHALOPODES A TOURS DÉROULÉS ET RUDISTES*		
		SÉRIE NÉOCRÉTACIQUE	*OISEAUX REPTILIENS*			Nouvelle immersion du bassin anglo-français.
TERTIAIRE	*ÉOGÈNE*	*ÉOCÈNE*	*RÈGNE DES MAMMIFÈRES*	*NUMMULITES*	*PALMIERS DANS LE BASSIN DE PARIS*	Mer nummulitique. Soulèvement des Pyrénées.
		OLIGOCÈNE		*RÈGNE DES GASTROPODES ET DES ACÉPHALÉS*		Invasion septentrionale marine. Période des grands lacs.
	NÉOGÈNE	*MIOCÈNE*			*RÈGNE DES ANGIOSPERMES*	Mer mollassique. Soulèvement des Alpes.
		PLIOCÈNE		Invasion de la faune boréale dans la Méditerranée.		Rupture de l'Atlantique nord. Apparition des hivers.
MODERNE OU QUATERNAIRE	*PLÉISTOCÈNE* *RÉCENTE*		Extinction des grands proboscidiens. Apparition de l'homme.		Flore actuelle.	Grands glaciers. Adoucissement de la température.

APPENDICE

APERÇU GÉOLOGIQUE SUR LA RÉGION FRANÇAISE

---

§ 1

DÉVELOPPEMENT PROGRESSIF DU SOL FRANÇAIS

Le trait fondamental de la géologie française est l'existence, au centre de la région, d'un massif de terrain archéen, dont l'émersion remonte aux premiers temps paléozoïques. Sans doute ce massif a subi, depuis sa première formation, de nombreuses modifications; des accidents divers en ont affecté l'équilibre, et l'érosion, poursuivie durant toutes les périodes géologiques, lui a enlevé peu à peu les éléments détritiques à l'aide desquels s'est constituée une grande partie du sous-sol de notre pays. Néanmoins, à travers toutes ces vicissitudes, son individualité est demeurée distincte et, par une sorte de prédestination, cet îlot archéen, qui devait être un jour le dernier boulevard de l'indépendance gauloise, n'a jamais cessé de former le noyau du sol français.

Aujourd'hui, si l'on fait abstraction des formations éruptives qui en recouvrent une partie, le massif archéen constitue un plateau ondulé, de 600 mètres d'altitude moyenne, qu'on appelle avec juste raison le *Plateau central de la France*, et qui comprend le Limousin, une partie du Bourbonnais, le Forez, le Velay et l'Auvergne. A ce plateau se rattachent, à titre d'annexes, au nord-est le Morvan, dont le sépare une

dépression qui permet une communication facile entre le bassin de la Loire et celui du Rhône; au sud, les Cévennes, d'une part, et la Montagne Noire, de l'autre, séparées par le golfe jurassique de l'Aveyron.

Deux autres îlots archéens doivent encore attirer l'attention : d'abord celui qui forme la Vendée et la lisière sud-ouest de la Bretagne; d'autre part, le massif de gneiss et de granite de la partie centrale des *Vosges*, ayant son symétrique de l'autre côté du Rhin, dans la Forêt Noire, et se reliant souterrainement au Morvan, comme en témoigne la protubérance gneissique de la *Serre*, qui surgit en Franche-Comté au milieu des terrains jurassiques. Enfin sur le littoral de la Provence, un autre îlot, celui des *Maures* et de l'*Esterel*, se révèle aussi comme un massif très anciennement émergé.

Battus par les flots des océans précambriens, ces premiers îlots ont vu se former autour d'eux une ceinture de phyllades et de grauwackes. Les dépôts ainsi produits n'ont pas sensiblement accru l'étendue originelle du Plateau Central ni celle des Vosges. En revanche, ceux qui étaient venus s'adosser au versant nord de la bande archéenne de la Vendée et du Morbihan, ayant été émergés peu de temps après leur formation, ont fait naître dans la mer silurienne une grande île, qui ne devait plus subir ultérieurement que des submersions partielles; c'est l'*Armorique* ou *Bretagne*, avec son prolongement naturel, la presqu'île du *Cotentin*, reliée sous la Manche à la péninsule de Cornouailles. En même temps que se produisait cette émersion, une autre avait lieu au nord-ouest des Vosges, et les mêmes sédiments cambriens, venus au jour dans l'*Ardenne* et le Brabant, y formaient une île limitant au nord la région française.

A ce moment, s'est trouvé défini ce qu'on appelle le *Bassin de Paris*. Désormais le Cotentin, la Bretagne, la Vendée, le Plateau Central, le Morvan, les Vosges et l'Ardenne enfermeront, dans un cercle presque complet, une région de sédimentation dont le centre coïncide avec l'emplacement actuel de la capitale de la France. Là viendront converger les éléments détritiques enlevés par l'érosion à la partie des massifs anciens qui se déverse de ce côté, jusqu'à ce que cet

apport, maintes fois renouvelé, ait rempli la cuvette parisienne et chassé la mer de son territoire. Ainsi la France se trouvera partagée en deux régions distinctes, l'une, septentrionale, nettement délimitée en forme de bassin, l'autre méridionale, baignée par une mer bien ouverte et où les formations garderont le caractère pélagique, au moins à l'est du large détroit qui sépare le Plateau Central de la France d'un autre massif semblable, la *Meseta* de la péninsule ibérique. Un jour, dans ce détroit, la chaîne des Pyrénées fera son apparition, ramenant à la surface une bande de terrains primaires, et alors on pourra distinguer dans la région française trois parties : le *Bassin de Paris*, de beaucoup le mieux développé et le plus homogène; le *Bassin de la Garonne* ou *Golfe de l'Aquitaine*; enfin le *Bassin du Rhône*, que le soulèvement des Alpes n'isolera qu'à la dernière heure des régions méditerranéennes orientales.

Si le bassin de Paris est déjà esquissé dès la fin de la période précambrienne, du moins il ne recevra sa forme définitive que quand les sillons et les échancrures de la Bretagne, de l'Ardenne et du Plateau Central auront été comblés par les dépôts siluriens, dévoniens, carbonifériens et permiens. Même, à ce moment, tout ne sera pas dit encore et il faudra que la période triasique s'achève. Par là seulement cessera l'indécision par suite de laquelle, dans l'est de la France, la mer est si souvent en lutte avec la terre ferme jusqu'à la fin du dépôt des marnes irisées; si bien qu'à cette époque il est difficile de dire ce que pouvait être la condition des pays situés à l'ouest du méridien de Dijon.

Mais il n'en est plus ainsi à l'ouverture de la période liasique. A peu près tout le bassin de Paris est inondé. Le rivage, partant du Cotentin, va rejoindre l'Ardenne, envoie dans le Luxembourg une pointe avancée, puis se coude vers le sud jusqu'à un large détroit, reliant la mer parisienne à la Méditerranée par l'intermédiaire d'une région mixte, celle du Jura. Du Morvan, en grande partie, sinon en totalité, immergé, le rivage se dirige à l'ouest-sud-ouest le long du Plateau Central et aboutit, entre ce dernier et la Vendée, à un autre détroit moins large, celui du Poitou, qui établit la liaison

entre la cuvette parisienne et l'Atlantique. Puis la côte se coude au nord, longe la Bretagne et le Cotentin et, à travers la Manche, alors fermée, rejoint le pays de Cornouailles pour continuer sa route vers le nord de l'Angleterre.

Pendant ce temps, au delà de Poitiers, la mer liasique suit le bord sud-ouest du Plateau Central et couvre la région pyrénéenne, s'étendant jusqu'au Plateau espagnol; puis à partir des Cévennes, son rivage, longeant le Vivarais et le Lyonnais, va rejoindre le Morvan.

A dater de la période liasique, la sédimentation devient de plus en plus calme et finit par permettre le développement des polypiers constructeurs, surtout au voisinage du détroit de la Côte-d'Or comme de celui du Poitou. Puis, après la période mésojurassique il se produit une retraite progressive de la mer; les sédiments couvrent de moins en moins d'espace et leurs affleurements forment, à l'intérieur de celui du lias, une série de bandes concentriques, surtout entre les Ardennes et le Berry. Plus tard, l'érosion, profitant de la différence de résistance des roches, accentuera ces zones en façonnant le bord de quelques-unes d'entre elles sous forme de falaises destinées à jouer un rôle spécial, aussi bien dans l'orographie que dans la défense du pays.

Ce mode de dépôt des sédiments, en plaques concentriques de moins en moins étendues, se poursuit, dans la partie orientale du bassin de Paris, jusqu'à la fin des temps crétacés. Mais il n'en est pas de même dans l'ouest, où la mer de la craie, débordant les dépôts éocrétaciques et même, en quelques points, les sédiments jurassiques, a laissé des témoins jusque sur le sol de Bretagne et de la Vendée. Le détroit du Poitou s'est fermé avant la fin de la période jurassique. Quant au détroit de la Côte d'Or, il semble aussi avoir été transformé en isthme à la fin de la même époque, par le fait d'une émersion qui s'étendait jusqu'au bord des Alpes, mais qui n'a pas persisté longtemps; car, vers les débuts de la période néocomienne, la mer, arrivant du sud-est, atteignait la Champagne et le Berry, alors que, dans le nord-ouest, les formations continentales, ou tout au moins les dépôts d'estuaire, avaient momentanément le dessus.

Lorsque la période crétacique prend fin, la mer a si bien rétréci son domaine, qu'elle ne forme plus guère que des flaques entre Montereau et la Belgique.

Alors s'ouvrent les temps tertiaires. Pendant l'éocène, tout le Midi est soumis à un régime de sédimentation uniforme, caractérisé par les calcaires à nummulites. Les détroits du Poitou et du Morvan sont fermés, et le bassin de Paris n'a plus de communications avec le sud qu'en contournant le Cotentin et la Bretagne.

Dans ce bassin, une série d'invasions et de retraites de la mer amène la formation d'une suite de sédiments. L'érosion, en enlevant les bords de ces dépôts, laissera un jour le massif éocène central se détacher en saillie, du côté de l'est, sur sa base crayeuse, mise à jour dans les plaines de la Champagne. De cette manière, le terrain tertiaire sera limité de ce côté par une falaise où l'Yonne, la Seine, la Vesle, l'Aisne et l'Oise ne pénètrent qu'en paraissant forcer de véritables défilés.

Pendant que s'effectue le remplissage de la cuvette parisienne, le pourtour voit se former, par destruction mécanique ou chimique des couches superficielles, des conglomérats de silex qui couvrent le Sancerrois, le Thimerais et une grande partie de la Normandie, de la Picardie et de la Flandre.

L'oligocène ramène la mer, venant du nord, jusqu'aux confins de l'Orléanais, pendant que l'activité thermale ou simplement météorique se traduit en Lorraine, en Franche-Comté, en Bourgogne, dans le Nivernais, le Berry, le Poitou, le Quercy, etc., par la formation des dépôts sidérolithiques. Une autre mer s'est établie dans le golfe de l'Aquitaine, que le soulèvement pyrénéen vient d'isoler de la Méditerranée, et un bras de cette mer remonte par Nantes jusqu'à Rennes.

Puis les eaux marines abandonnent le bassin de Paris, dont le grand lac de la Beauce (déjà préparé à l'époque précédente par celui de la Brie) prend possession. A la même heure, d'autres lacs souvent saumâtres occupent la Limagne, le Cantal, le Velay, le Languedoc, une partie de la Provence et de la Gascogne.

Le golfe de l'Aquitaine s'agrandit un peu à l'époque de la

mollasse, lors de cette invasion helvétienne qui fait arriver la mer à Blois et aux portes de Rennes, tandis que, par la vallée du Rhône, elle remonte en Suisse et jusqu'au cœur de la Franche-Comté. Mais les Alpes se dressent à leur tour, pendant que l'Auvergne commence la série de ses éruptions. En même temps que les sommités du Cantal, du Mont-Dore, du Velay et du Vivarais s'édifient sur leur base de gneiss, de granite et de micaschiste, la mer essaye, dans le sud, un retour sur la vallée du Rhône, le golfe de Perpignan et la région de Montpellier. Puis elle rentre dans ses limites actuelles, et l'époque quaternaire ne la voit plus revenir sur aucune partie de notre territoire.

§ 2

RÉGIONS NATURELLES DE LA FRANCE

Par suite des nombreuses vicissitudes que la géographie française a traversées, le sol de notre pays offre, dans son relief comme dans sa composition, une grande variété. Entreprendre une description de ce sol serait sortir des limites qui conviennent à un abrégé [1]. Nous nous bornerons à de courtes indications sur les principales régions naturelles, en insistant particulièrement, à cause de son unité, sur le **Bassin de Paris.**

Au centre de ce bassin, les dépôts tertiaires forment un tout assez homogène qui se termine, comme nous l'avons déjà dit, par une falaise du côté de l'est et du nord-est. De la sorte, en étendant un peu l'ancienne acception du mot **Ile-de-France**, on peut désigner par là toute cette grande île tertiaire, dont le couronnement est constitué par le fond plat des anciens lacs de la Beauce et de la Brie, et au pied de laquelle les plaines de la craie, avec leurs douces ondulations, donnent en quelque sorte l'illusion d'une mer. Entre la Seine et l'Oise, la falaise tertiaire envoie par endroits de véritables promontoires, et il s'en détache des îlots pareils à des cita-

1. Voir pour plus de détails notre *Géologie en chemin de fer.*

delles avancées, comme ceux de Laon et du mont de Berru, près de Reims. La même constitution se remarque au nord, dans le Noyonnais, et l'on en retrouve des traces à l'ouest, dans le Vexin.

A l'intérieur, l'Ile-de-France présente une composition très variable. Il suffit de citer le contraste du Gâtinais français, c'est-à-dire des environs de Fontainebleau, où une masse sableuse est encadrée entre les nappes lacustres horizontales de la Beauce et de la Brie, avec le Valois, où les sables oligocènes ne forment plus que des éminences allongées, à la surface d'un plateau éocène, entamé par des vallées rares et profondes. Tout à côté, le Soissonnais introduit, grâce à la nature meuble et fertile des dépôts de l'éocène inférieur, un nouveau type de passage, qui comporte, avec une surface infiniment plus découpée, des niveaux d'eau plus nombreux. Enfin, le travail d'érosion quaternaire a atteint son maximum d'intensité à Paris, où la rencontre de l'Oise, de la Marne et de la Seine n'a plus laissé subsister, de l'éocène supérieur et de l'oligocène, que des *témoins*, tels que la butte de Montmartre et le mont Valérien.

Suivons maintenant, autour de l'Ile-de-France, les zones concentriques que forment les affleurements de plus en plus anciens. Ce n'est pas par le sud que pourra commencer cette recherche; car, à la place où devrait apparaître la craie blanche, le lac de la Beauce a étendu un manteau uniforme de marnes et de calcaires, recouvert ultérieurement par une nappe de limon qui en fait un pays essentiellement agricole. Ce plateau, en raison de son âge géologique, devrait dominer tous les autres, mais il s'abaisse en pente douce vers la Loire, par l'effet du mouvement qui, à la fin de l'époque aquitanienne, a déterminé l'assèchement du lac et la disparition de la partie méridionale de son fond sous les sables et argiles de l'Orléanais. De cette manière, non seulement l'Ile-de-France ne se dessine pas en falaise au sud, mais il n'y a, à vrai dire, de ce côté, aucune séparation naturelle entre le bassin de la Loire et celui de la Seine.

A l'est de la Beauce, le Gâtinais, sous une couverture de dépôts tertiaires divers, d'origine continentale, laisse aperce-

voir dans les vallées la masse crayeuse. Enfin, celle-ci affleure définitivement en **Champagne**, et, depuis la vallée de la Seine jusqu'à celle de l'Aisne, demeure presque partout à découvert, formant une zone infertile, la **Champagne pouilleuse**, dont la monotonie n'est rompue que par quelques plantations de pins.

Bien que la craie se poursuive au delà de la Champagne, le caractère de ses affleurements se modifie progressivement, à mesure qu'on approche de l'ancien détroit tertiaire franco-belge. En effet, la destruction des sédiments meubles, étalés sur ce détroit aux époques éocène et oligocène, a laissé sur la craie un manteau d'argile à silex et de limon, qui change complètement l'aspect et la valeur du sol. Il en est de même, et pour la même cause, en **Picardie** et surtout en **Normandie**, notamment dans le fertile **Pays de Caux**, où le *bief à silex* atteint parfois, sous le limon, 30 mètres d'épaisseur. Seulement, dans l'intervalle, un soulèvement spécial, celui du **Pays de Bray**, a fait naître, en déchirant la couverture crayeuse, une véritable oasis mamelonnée, de sédiments éocrétaciques et jurassiques, dont la nature se prête à merveille à la création des herbages. Du reste, grâce à la proximité de la mer et de la vallée de la Seine, le plateau normand se trouve entaillé par des vallées profondes, qui en rompent partout la monotonie.

Au sud de la Normandie, la craie est encore masquée par des argiles à silex telles que celles du **Thimerais**, desquelles on passe insensiblement à la **Beauce** occidentale du pays chartrain.

La **Sologne** cache, au sud, le turonien et le cénomanien, comme la Beauce avait dissimulé la craie blanche. Les deux étages se confondent plus ou moins dans l'Yonne avec la craie et ne commencent à se distinguer qu'au nord de la Marne, où la roche devient plus marneuse. Aussi, de ce côté, depuis Valmy jusqu'au delà de Rethel, la craie proprement dite se dessine-t-elle en saillie, par suite de l'érosion qui a fait disparaître la ceinture marneuse turonienne, en formant, au-devant des Ardennes, la blanche *falaise de Champagne*. Les marnes dominent encore plus au nord de l'Aisne,

où les *dièves* constituent le sol plat et fertile du pays de **Thiérache**, ainsi que la haute vallée de la Sambre, dont la verdure contraste si bien avec l'aspect des plateaux picards.

Tandis que les affleurements crayeux formaient la *Champagne sèche*, ceux des sédiments éocrétaciques, où domine l'élément argileux, engendrent la *Champagne humide*, région doucement ondulée, abondamment arrosée, qui commence à la **Puisaye**, pour se terminer aux Ardennes, après avoir embrassé la majeure partie de l'**Argonne**.

Au-delà de cette bande de bois et de prés, les affleurements jurassiques ramènent une zone calcaire et relativement aride; c'est celle qui comprend à la fois la **Champagne berrichonne**, avec ses cailloux de calcaire lithographique partout épars, une portion du **Nivernais**, une notable partie de la Haute-Marne et de la Meuse, c'est-à-dire le **Bassigny** et le **Barrois**, enfin les abords de la vallée de la Meuse en **Lorraine**, du moins au sud de Toul; car au delà le facies argileux reparaît dans la grande plaine de la **Woëvre**.

La dernière bande jurassique, celle du lias, se distingue, depuis le Berry jusqu'en Lorraine, en passant par l'**Auxois** pour s'interrompre un moment dans la Côte-d'Or, par la fertilité des terres et par les formes découpées du terrain, surtout quand les plates-formes de calcaire à entroques viennent couronner les bandes de marnes liasiques.

A l'ouest une succession analogue s'observe, mais sur de moindres proportions, entre l'embouchure de la Seine et le Cotentin. Arès les herbages du **Pays d'Auge**, à sous-sol argileux formé par le jurassique supérieur, la **Campagne de Caen** et celle de la Sarthe ramènent les plaines calcaires mésojurassiques, en attendant que, de Bayeux à Valognes, le lias affleure avec son aspect habituel dans le **Bessin**.

Mais, dès le département de l'Orne, la transgression crétacée fait disparaître tout affleurement jurassique et l'on voit, faisant suite au **Thimerais**, deux régions de bois et de prés, le **Perche** et le **Maine**, assises sur les couches sableuses et argileuses du cénomanien. Toutes deux aboutissent, avant la vallée de la Loire, d'une part à la **Sologne** occidentate, d'autre part à la dépression de la **Touraine**, confluent de

vallées au delà duquel on rejoint le Berry par la **Brenne,** région d'argiles et de sables tertiaires, supportés par un grand massif mésojurassique.

Portons maintenant notre attention sur la ceinture extérieure du bassin. Après la petite oasis primaire du **Bas-Boulonnais,** les sondages de l'Artois et de la Flandre nous apprennent à suivre, sous les *morts-terrains* crayeux, le terrain houiller qui prolonge le massif ancien du Brabant et de l'**Ardenne** : cette dernière région, haut plateau de schiste et de quartzite, couvert de bois et de landes, se soude à l'Eifel et au Hunsrück. A son pied nous trouvons le trias, si développé en **Lorraine,** où les marnes irisées constituent de vastes plaines au sol rouge, tandis que, sur les **Vosges,** les grès triasiques, relevés à de grandes hauteurs, forment des rochers pittoresques, ou des terrasses dont les contours géométriques tranchent sur les lignes adoucies des **Ballons.**

La **Côte-d'Or,** par l'aspect du sol dijonnais, atteste les efforts qui ont fini par isoler le **Jura** du bassin de Paris. Franchissons-la pour arriver au **Morvan,** cet écart du Plateau Central, lardé de granites, de porphyres, de porphyrites, région de bois et de prairies, difficile d'accès et de culture.

De là nous passons au **Plateau Central** qui, malgré son apparente homogénéité, comprend trois parties distinctes : à l'ouest le **Limousin**; au centre, l'**Auvergne**; à l'est, le **Forez,** le **Beaujolais** et les **Cévennes.**

Le **Limousin** est un plateau de gneiss et de micaschistes, accidenté par des bosses de granite granulitique formant des massifs remarquablement arrondis. L'un des plus nets est le noyau de pegmatite de Millevaches, où tant de rivières prennent leur source. Tout le Limousin forme une région de petits bois et de maigres prairies, parfois de landes sévères et incultes, où le sol est propice au châtaignier.

L'**Auvergne** diffère beaucoup du Limousin, d'abord par l'altitude du massif archéen qui, dans l'est, finit par dépasser 900 mètres, ce qui a déterminé l'ouverture de vallées profondes et abruptes; ensuite par les changements considérables que la surface a subis par le fait des phénomènes volcaniques. Ceux-ci ont étendu sur le **Cézallier,** le **Cantal,** la

Planèze, etc., un déluge de basalte, qui a puissamment modifié, en l'enrichissant, la nature du sol du plateau. En outre, les éruptions ont édifié sur cette base des cimes dont les restes, après une longue érosion, demeurent capables de dépasser, non seulement 1 400 mètres comme le Puy de Dôme, mais 1 800 mètres comme le Mont-Dore, le Cantal, le Mézenc. De là une extrême variété d'aspects et de productions, encore accrue par le phénomène qui a ouvert, entre l'Auvergne et le **Forez**, la profonde échancrure de la **Limagne**. Les sédiments meubles de ce lac tertiaire, dispersés par l'érosion, ont laissé se former à leur place une riche et fertile vallée.

Élie de Beaumont a fait remarquer que le Cantal, avec ses profondes vallées divergentes, représentait un centre culminant de dispersion, duquel tout s'écarte, tandis qu'au contraire tout converge vers Paris. D'ailleurs la nature, qui s'est montrée si peu prodigue de ses richesses envers le Cantal, a accumulé comme à plaisir, dans la région parisienne, tous les éléments propres au développement de la civilisation, c'est-à-dire les vallées bien ouvertes, les plaines fertiles et des matériaux de construction de toutes sortes. Ainsi l'importance prise par la capitale française n'est pas un effet du hasard, et l'on peut dire que l'ensemble des conditions géographiques et géologiques la prédestinait au rôle qu'elle a joué dans l'histoire.

Du Limousin, par les plaines jurassiques du **Poitou**, on parvient en **Vendée**, où la nature du sol, jointe à l'humidité du climat marin, donne au paysage un caractère bien exprimé par le mot de **Bocage**. Cette appellation convient aussi, pour la même cause, à une grande partie du sol schisteux de la **Bretagne**, tandis que, dans la bande archéenne du Morbihan, dominent les landes sauvages. Le **Cotentin** est aussi un bocage, c'est-à-dire un pays d'élevage, morcelé en prairies qu'entourent des haies vives avec de beaux arbres, de telle sorte que, vue de loin, la région offre l'aspect d'une succession de petits bois, parfois dominés par des chaînes granitiques régulières ou par des crêtes de grès armoricain.

Ce que nous avons appelé le **golfe de l'Aquitaine** offre une structure beaucoup plus simple que celle du bassin de Paris.

Les zones concentriques du Plateau Central ne se dessinent que dans les **Charentes** et le **Périgord**. Encore, si la série jurassique est complète, tout l'éocrétacique manque, et le néocrétacique lui-même, presque toujours recouvert de lambeaux tertiaires, dépasse à peine, dans son affleurement, le cours de la Dordogne.

Tandis que par la Pointe de Grave jusqu'à l'embouchure de l'Adour, la côte est couverte par une large bande de *sable des* **Landes**, presque tout le bassin de la Garonne, c'est-à-dire l'**Agenais**, l'**Armagnac**, le **Castrais**, le **Pays de Toulouse**, disparaît sous un manteau de sédiments tertiaires d'eau douce, ne laissant apercevoir qu'à l'ouest les traces de l'ancien golfe mollassique. Au sud seulement, à partir de la **Chalosse**, les dépôts éocènes nummulitiques, puis les couches crétaciques, se montrent en bandes relevées le long de la grande muraille pyrénéenne, dont l'axe est formé par les sédiments primaires entrecoupés de granite. Cette muraille présente, dans sa structure, deux régions de maximum de complication, l'une à l'ouest dans la **Navarre**, l'autre dans l'**Ariège**, à quoi il faut ajouter le massif granitique des Pyrénées-Orientales, qui sert d'appui au district disloqué des **Corbières**. Ce dernier est séparé par une dépression de la **Montagne Noire**, promontoire méridional du Plateau Central, limitant avec les **Cévennes** le golfe jurassique de l'Aveyron et de la Lozère. Là, les sédiments jurassiques calcaires affleurent en masses puissantes et horizontales, entaillés par de rares et profondes vallées, véritables *canyons*, et leur surface forme les plaines pierreuses et monotones connues sous le nom de **Causses**.

Quatre régions se partagent le bassin du Rhône : le **Jura**, la **Bresse**, les **Alpes** et la **Provence**. Le **Jura** franc-comtois est formé par les couches jurassiques, en plis successifs, souvent remarquables par leur régularité, enfermant des lambeaux crétaciques et, près de la Suisse des sédiments tertiaires d'âge helvétien.

De même qu'à l'est le massif jurassien se termine brusquement, par une ligne de lacs, contre la plaine tertiaire de la **Suisse**, de même, à l'ouest, il surgit tout d'un coup au-dessus

de la plaine de la Saône, vaste dépression qui prolonge la **Bresse** au nord en suivant le pied du Plateau Central. On y devine les traces d'un ancien lac pliocène qui s'étendait au sud jusqu'à Lyon, et dont la partie orientale a reçu, dans les **Dombes**, les déjections des torrents issus des grands glaciers alpins.

Tandis que le Jura est surtout une région de plis réguliers, les failles, les renversements, les recouvrements et les dislocations compliquées abondent dans les **Alpes**. L'effort orogénique y a fait apparaître, en larges traînées, les schistes cristallins, mais plus exempts des injections granitiques si fréquentes dans le Plateau Central. Relevés contre ces schistes, les dépôts jurassiques et crétaciques se montrent dans le **Dauphiné**, notamment dans le massif de la Grande-Chartreuse.

Mais leur étendue diminue bien vite en **Provence**, où le morcellement et la variabilité des dépôts trahissent l'influence de l'ancien massif des **Maures et de l'Esterel**, recouvert dans sa partie orientale par des épanchements porphyriques d'âge permien. On sent que ce massif a dû former une île, au milieu de la mer où se déposaient les sédiments pélagiques secondaires, à l'époque où les Alpes devaient être à peine indiquées par quelques îlots. Cette île se prolongeait vers le sud et n'était sans doute qu'une pointe d'un territoire, aujourd'hui effondré, qui rejoignait les Maures aux Baléares et peut-être à la Corse.

Un mouvement orogénique post-oligocène a fortement disloqué les dépôts secondaires de la Provence. Puis l'érosion, d'une part, la superposition des plis alpins aux plis provençaux, d'autre part, sont venus imprimer à la géologie de la région une complication qui contraste avec l'allure adoucie de sa topographie.

FIN

938-06. — Coulommiers. Imp. PAUL BRODARD. — 8-06.

A. de

51°

50

49

48°

47

Terr

Ro

Eru

46

Grou

ju

cr

45

Grou

Cor

Grav

ENSEIGNEMENT SECONDAIRE

Nouveau Cours de Grammaire Française

Par H. BRELET

CLASSES PRÉPARATOIRES

Premières leçons de Grammaire française, à l'usage des Classes Préparatoires, par H. BRELET et MATHEY, professeur de Huitième au lycée Janson-de-Sailly. *Nouvelle édition*, corrigée. 1 vol. in-16, cartonné toile souple. . . . . 2 fr.

Ce volume comprend à la fois les **leçons** et les **exercices** qui y correspondent.

II

CLASSES ÉLÉMENTAIRES

Éléments de Grammaire française, à l'usage des classes de Huitième et de Septième, par H. BRELET. *Quatrième édition*, revue et corrigée. 1 vol. in-16, cartonné toile souple. . . . . 2 fr.

Exercices sur les Éléments de Grammaire française, à l'usage des classes de Huitième et de Septième, par V. CHARPY, agrégé de Grammaire, professeur de Quatrième au lycée Janson-de-Sailly. *Quatrième édition*. 1 vol. in-16, cartonné toile souple. . . . 2 fr.

III

PREMIER CYCLE

Divisions **A** *et* **B**.

Abrégé de Grammaire française, à l'usage des classes de Sixième et de Cinquième, par H. BRELET. *Troisième édition*, revue et corrigée vol. in-16, cartonné toile souple. . . . . 2 fr. 50

Exercices sur l'Abrégé de Grammaire française, à l'usage des classes de Sixième et de Cinquième, par H. BRELET et V. CHARPY. *Troisième édition*. 1 vol. in-16, cartonné toile souple . . . 2 fr. 50

IV

Grammaire française, à l'usage de la classe de Quatrième et des Classes supérieures, par H. BRELET. *Deuxième édition*. 1 vol. in-16, cartonné toile. . . . . 3 fr.

Exercices sur la Grammaire française, à l'usage de la classe de Quatrième et des Classes supérieures, par H. BRELET et V. CHARPY. 1 vol. in-16, cartonné toile. . . . . 3 fr.

ENSEIGNEMENT SECONDAIRE

NOUVEAU COURS DE Grammaire Latine et de Grammaire Grecque

Par H. BRELET

Volumes in-16, cartonnés toile anglaise.

Abrégé de Grammaire latine. (*Premier cycle* : Sixième, Cinquième, Quatrième et Troisième *A*. — *Deuxième cycle* : Secondes-Premières *A. B. C.*) *Septième édition* . . . . 2 fr.

Abrégé de Grammaire grecque. (*Premier cycle* : Quatrième et Troisième *A*. — *Deuxième cycle* : Deuxième et Première *A*). *Troisième édition* . . . . 2 fr.

Nous publions ces deux *Abrégés* pour répondre au mouvement d'opinion qui s'est prononcé contre certaines tendances des grammairiens modernes à donner à leurs livres un caractère trop savant. Pour ceux qui voudraient pousser plus loin leurs études, nous continuons à vendre nos Cours supérieurs de Grammaire latine et grecque.

EXERCICES CORRESPONDANTS

Exercices latins (*Versions et thèmes*), (classe de **Sixième**), par M. V. Charpy, agrégé de grammaire, professeur de Quatrième au lycée Janson-de-Sailly. Troisième édition. . . . . 2 fr.

Exercices latins (*Versions et thèmes*), (classe de **Cinquième**), par MM. Brelet et V. Charpy. Deuxième édition. . . . . 2 fr. 50

Exercices latins (*Versions et thèmes*), (classe de **Quatrième**), par MM. H. Brelet et P. Faure, professeur de Rhétorique au lycée Janson-de-Sailly. Deuxième édition, revue et corrigée. 2 fr. 50

Exercices latins (*Versions et thèmes*), (**classes supérieures**), par MM. H. Brelet et P. Faure. . . . . 3 fr.

Exercices grecs (*Versions et thèmes*), (classe de **Cinquième**), (*ancien programme*), par MM. H Brelet et V. Charpy, Deuxième édition. . . . . . 1 fr. 50

Exercices grecs (*Versions et thèmes*), sur les déclinaisons et les conjugaisons, (classe de **Quatrième**) (*nouveau programme*), par MM. H. Brelet et V. Charpy. Nouvelle édition. . . . . 2 fr.

Exercices grecs (*Versions et thèmes*), sur la syntaxe (**classes supérieures**), par MM. H. Brelet et P. Faure. . . . . 3 fr.

COURS SUPÉRIEUR

Grammaire latine (Classes supérieures). Sixième édition. . 2 fr. 50

Grammaire grecque (Classes supérieures). Troisième édition. 3 fr. »

Tableau des exemples des grammaires grecque et latine (classe de **Quatrième** et **classes supérieures**). 1 vol. petit in-8°. cartonné. . . 80 c.

Chrestomathie grecque, ou Recueil de textes gradués (classes de **Quatrième** et de **Troisième**). Nouvelle édition entièrement refondue . . 2 fr. 50

Epitome historiæ græcæ (classe de **Quatrième**), avec deux cartes en couleurs et figures dans le texte . . . . 2 fr.

ENSEIGNEMENT SECONDAIRE

Langues vivantes (suite)

Extraits des Auteurs allemands

I. Classes de Quatrième et de Troisième

1 vol. in-16, cart. toile . . . . 2 fr. 50

II. Classes de Seconde et Première

1 vol. in-16, cart. toile. . . . . 3 fr.

Ouvrages de M. VESLOT

Agrégé de l'Université, professeur au lycée de Versailles.

Rédigés conformément aux programmes du 31 mai 1902

Lectures anglaises

Pour les classes de Seconde et de Première.

(*Histoire, géographie, arts, sciences, avec notes en anglais*).

1 vol. in-16, cartonné toile. . . . . 3 fr.

English Grammar

Deuxième édition. 1 vol. in-16. cartonné toile . . . . 1 fr. 50

Grammaire Espagnole

Par I. GUADALUPE, professeur au Collège Rollin et aux Cours de la Ville.

Troisième edition, revue et augmentée

1 volume in-16, cartonné toile anglaise. . . . . 3 fr

Ouvrages de

MM. E. BAUER et DE SAINT-ÉTIENNE

Professeurs à l'École alsacienne.

Premières Lectures Littéraires

1 vol. in-16, cartonné toile (*Douzième édition*.). . . . . . . 1 fr. 50

Nouvelles Lectures Littéraires

Avec notes et notices, et Préface par M. Petit de Julleville

1 vol. in-16, cartonné toile (*Huitième édition.*) . . . . 2 fr. 50

Récitations Enfantines

à l'usage des classes élémentaires des lycées et collèges

1 vol. in-16, avec figures, cartonné toile (*Deuxième édition*). 1 fr. 25

BRUNOT, professeur à la Faculté des lettres de Paris.

Précis de Grammaire historique de la langue française, avec une introduction sur les origines et le développement de cette langue. *Ouvrage couronné par l'Académie française*, 4e édition augmentée d'indications bibliographiques et d'un index. 1 vol. in-18, cart. toile verte . . . . 6 fr.

CAUSSADE (De), Conservateur à la Bibliothèque Mazarine, membre des commissions d'examens de l'Hôtel de Ville.

Notions de Rhétorique et étude des genres littéraires. 10e édit. 1 vol. in-18, toile anglaise . . . . . 2 fr. 50

Littérature grecque. 6e édit. 1 vol. in-18, toile anglaise. 3 fr.

Littérature latine. 4e édit. 1 vol. in-18, toile anglaise. 6 fr.

LE GOFFIC (Charles) et **THIEULIN (Édouard)**, professeurs agrégés de l'Université.

Nouveau traité de versification française, à l'usage des lycées et des collèges, des écoles normales, du brevet supérieur et des classes de l'enseignement secondaire des jeunes filles. 4e édition revue et augmentée. 1 vol. in-16, cart. toile. 1 fr. 50

LIARD, vice-recteur de l'Académie de Paris.

Logique (cours de Philosophie), 6e édition. 1 volume in-18, cartonné toile. . . . . 2 fr.

MORILLOT (Paul), professeur à la Faculté de Grenoble.

Le Roman en France depuis 1610 jusqu'à nos jours. *Lectures et Esquisses*. 1 vol. in-16. . . . . 5 fr.

CLÉDAT, professeur à la Faculté des lettres de Lyon, lauréat de l'Académie française.

Précis d'orthographe et de grammaire phonétiques pour l'enseignement du français à l'étranger. 1 vol. in-18. . 1 fr.

HANNEQUIN, professeur à la Faculté des lettres de Lyon.

Introduction à l'étude de la psychologie. 1 volume in-18. . . . . 1 fr. 50

Ouvrages de M. PETIT DE JULLEVILLE

Professeur à la Faculté des lettres de Paris.

HISTOIRE DE LA *Littérature Française*

Depuis les origines jusqu'à nos jours

Nouvelle édition, augmentee pour la peri. de contemporaine. 1 vol. in-16, cart. toile. . . . . 4 fr.

On peut se procurer séparément :

DES ORIGINES A CORNEILLE. Seizième édition. 1 vol. in-16, cart. toile. . . . . 2 fr.

DE CORNEILLE A NOS JOURS. Dix-septième édition revue et mise à jour, par M. Auguste AUDOLLENT, maître de conférences à l'Université de Clermont. 1 vol. in-16, cart. toile . . . . 2 fr.

MORCEAUX CHOISIS *des Auteurs français*

poètes et prosateurs

AVEC NOTES ET NOTICES

1 vol. in-16, cart. toile . . . . . 5 fr.

Nouvelle édition renfermant environ 100 extraits des principaux écrivains depuis le onzième siècle jusqu'à nos jours, avec de courtes notices d'histoire littéraire. Cette nouvelle édition, revue et mise à jour par M. A. Audollent, maître de conférences à l'Université de Clermont, a été augmentée d'un choix d'extraits des écrivains contemporains depuis Leconte de Lisle et Flaubert jusqu'à A. Daudet, Pierre Loti, Anatole France, Guy de Maupassant, Paul Bourget et Edmond Rostand.

On vend séparément:

I. MOYEN AGE ET XVIe SIÈCLE. — II. XVIIe SIÈCLE. — III. XVIIIe ET XIXe SIÈCLES.
Chaque volume, cart. toile verte, est vendu séparément . . . . 2 fr.

LEÇONS de Littérature Grecque

Par M. CROISET, membre de l'Institut, professeur à la Faculté des lettres.
9e édition. 1 vol. in-16, cart. toile. . . . . 2 fr.

LEÇONS de Littérature Latine

Par MM. LALLIER, maître de conférences, et LANTOINE, secrétaire de la Faculté des lettres de Paris.
7e édition. 1 vol. in-16, cartonné. . . . . . 2 fr.

PREMIÈRES LEÇONS D'HISTOIRE LITTÉRAIRE

Littérature grecque, littérature latine, littérature française, par MM. CROISET, LALLIER et PETIT DE JULLEVILLE.
7e édition. 1 vol. in-16, cartonné toile . . . 2 fr.

DEUXIEME CYCLE

Sections A. B. C. D

Géographie générale. Avec cartes et croquis, 2e édition. ***(Nouveau programme, classe de Seconde.)*** . . . . 4 fr.

Géographie de la France et de ses Colonies. — *Cours supérieur,* avec figures et cartes, 5e édition. ***(Nouveau programme, classe de Première.)*** . . . . 4 fr.

Les Principales Puissances du Monde avec la collaboration de M. J.-G. Kergomard, 2e édition. ***(Nouveau programme, classes de Philosophie et de Mathématiques)*** . . . . 4 fr. 50

CLASSES ÉLÉMENTAIRES

Cours d'Histoire et de Géographie

PAR

E. SIEURIN

Professeur au collège de Melun.

Classes préparatoires

1 volume in-16 cartonné toile, avec nombreuses figures 2 fr. 50

Classe de Huitième

1 volume in-16 cartonné toile, avec nombreuses figures. 2 fr. 50

Classe de Septième

1 volume in-16 cartonné toile, avec nombreuses figures. 2 fr. 50

Viennent de paraître:

Cahiers Sieurin

à l'usage des élèves de l'Enseignement secondaire

Classe de 6e . . . . 0 fr. 60

Classe de 5e . . . . 0 fr. 60

Les cahiers correspondant aux autres classes sont en préparation.

Cette publication a un but essentiellement pratique. economiser le temps de l'élève ; lui procurer le moyen de faire des croquis moins informes et plus profitables; présenter sur le même cahier les résumés et les cartes ; permettre au professeur de s'assurer rapidement que le travail donné a été fait.

ENSEIGNEMENT SECONDAIRE

Nouveau Cours d'Histoire

Rédigé conformément aux programmes du 31 mai 1902

PAR L.-G. GOURRAIGNE
Professeur au lycée Janson-de-Sailly,
à l'École normale supérieure d'enseignement primaire de Saint-Cloud
et à l'École coloniale.

Le moyen âge et le commencement des temps modernes (*Classes de Cinquième A et B.*) 1 volume in-16, avec nombreuses figures, cartonné toile . . . . 3 fr.

Les Temps modernes (*Classes de Quatrième A et B*). 1 vol. in-16, avec nombreuses figures, cartonné toile . . . . 3 fr.

L'Époque contemporaine (*Classes de Troisième A et B*). 1 vol. in-16, cartonné toile. . . . . 3 fr.

Histoire moderne (*Classes de Seconde*), (pour paraître en 1907).

Histoire moderne (*Classes de Première*), (pour paraître en 1907).

Histoire contemporaine de 1815 à 1889 (*Classes de Philosophie A et de Mathématiques A*). 1 vol. in-16, cart. toile. 5 fr.

Histoire de la Civilisation ancienne

Jusqu'au dixième siècle (Orient, Grèce, Rome, les Barbares

Programmes du 31 mai 1902 (*classes de Seconde et de Première*).

PAR CH. SEIGNOBOS
Docteur ès lettres, maître de conférences à la Faculté des lettres de Paris.

1 vol. in-16 de 450 pages, cartonné toile . . . . 4 fr.

Histoire de la Civilisation

PAR CH. SEIGNOBOS

VOLUMES IN-16, CARTONNÉS TOILE MARRON, AVEC FIGURES

Histoire de la civilisation ancienne (Orient, Grèce, Rome). 4e édition . . . . 3 fr. »

Histoire de la civilisation au moyen âge et dans les temps modernes. 4e édition. . . . . 3 fr. »

Histoire de la civilisation contemporaine. 4e édition. 3 fr. »

ENSEIGNEMENT PRIMAIRE SUPÉRIEUR

COURS de PHYSIQUE & de CHIMIE

Par **P METRAL**

Agrégé de l'Université, professeur à l'École primaire supérieure Colbert, Paris.

1[re] année. — **Physique et Chimie**, 4[e] édition. 1 vol. 2 fr. 50
2[e] année. — **Physique et Chimie**, 3[e] édition. 1 vol. 3 fr. 50
3[e] année. — **Physique et Chimie**, 3[e] édition. 1 vol. 2 fr. 50

Ce Cours se vend également ainsi divisé :

Cours de Physique (1[re], 2[e] et 3[e] années) . . . . 4 fr. »

Cours de Chimie (1[re], 2[e] et 3[e] années) . . . . 3 fr. 50

COURS D'ARITHMÉTIQUE (THÉORIQUE et PRATIQUE)

Par **M. H. NEVEU**

Agrégé de l'Université, professeur à l'École Lavoisier.

2[e] *édition*. 1 volume in-16, cartonné toile. . . . . 3 fr.

COURS D'ALGÈBRE (THÉORIQUE et PRATIQUE)

Suivi de NOTIONS DE TRIGONOMETRIE.

Par **M. H. NEVEU**

2[e] *édition*. 1 volume in-16, cartonné toile. . . . . 3 fr.

COURS DE GÉOMETRIE (THEORIQUE et PRATIQUE)

Par MM. **H. NEVEU** et **BELLENGER**

1[re] et 2[e] années (Géométrie plane). 1 vol. in-16, avec figures, cartonné toile . . . . 3 fr. 50

COURS D'INSTRUCTION CIVIQUE

Par **Albert METIN**

Professeur aux Écoles primaires supérieures de Paris.

1 volume in-16 avec figures, cartonné toile. . . . . 1 fr. 50

COURS D'ÉCONOMIE POLITIQUE et de DROIT USUEL

Par **Albert METIN**

1 volume in-16, cartonné toile. . . . . 2 fr.

COLLECTION LANTOINE

Extraits des Classiques Grecs et Latins

TRADUITS EN FRANÇAIS

Cette collection, qui s'adapte de tout point au nouveau plan d'études de l'Enseignement secondaire, est destinée aux élèves des classes de Troisième, de Seconde et de Première; elle sera particulièrement utile, dans les sections: **Latin-Grec, Latin-Langues vivantes, Latin-Sciences** aux candidats à la première partie du Baccalauréat, qui n'ont pas le temps de lire en entier, dans le texte même, tous les auteurs du programme.

Quant à l'inconvénient qu'il pourrait y avoir à mettre entre les mains des jeunes gens la traduction, même partielle, de tel ou tel écrivain, la circulaire ministérielle du 15 janvier 1890 nous paraît devoir lever tous les scrupules à cet égard : « Un emploi judicieux des traductions, « dit-elle, peut rendre de très grands services, non pas bien entendu « que les traductions puissent en toutes circonstances dispenser des « originaux..... ; mais, si l'étude directe des originaux doit rester sans « conteste au premier rang, **les traductions n'en ont pas moins « aussi leur rôle à jouer**, et un rôle plus considérable sans aucun « doute que celui qui leur est souvent attribué dans la tradition de nos « lycées. » Chacun des volumes comprend une notice biographique et littéraire, des notes et un index quand il a paru nécessaire.

Homère. *Odyssée* (Analyse et Extraits), par M. Allègre, professeur à la Faculté des lettres de Lyon.

Plutarque. *Vies des Grecs illustres* (Choix), par M. Lemercier, maître de conférences à la Faculté des lettres de Caen.

Hérodote (Extraits), par M. Corréard, professeur au lycée Charlemagne.

Homère. *Iliade* (Analyse et Extraits), par M. Allègre.

Plutarque. *Vies des Romains illustres* (Choix), par M. Lemercier.

Virgile (Analyse et Extraits), par M. H. Lantoine.

Xénophon (Analyse et Extraits), par M. Victor Glachant, professeur au lycée Buffon.

Eschyle, Sophocle, Euripide (Extraits), par M. Puech, maître de conférences à la Faculté des lettres de Paris.

Plaute, Térence (Extraits choisis), par M. Audollent, maître de conférences à la Faculté des lettres de Clermont.

Eschyle, Sophocle, Euripide (Pièces choisies), par M. Puech, maître de conférences à la Faculté des lettres de Paris.

Aristophane. Pièces choisies par M. Ferté, professeur au lycée Charlemagne.

Sénèque. Extraits par M. Legrand, professeur au lycée Buffon.

Cicéron. Traités. Discours. Lettres, par M. H. Lantoine.

César, Salluste, Tite-Live, Tacite (Extraits), par M. H. Lantoine, secrétaire de la Faculté des lettres de Paris.

Chaque volume est vendu cartonné toile anglaise. 2 fr.

PHYSIQUE

Ouvrages rédigés conformément aux programmes du 31 mai 1902

SOUS LA DIRECTION DE M.

E. FERNET

Inspecteur général de l'Instruction publique.

PAR MM.

FAIVRE-DUPAIGRE Inspecteur de l'Académie de Paris. | **CARIMEY** Professeur au lycée Saint-Louis.

Nouveau cours de Physique élémentaire

DEUXIÈME CYCLE (SCIENCES)

(Sections C et D)

I. **Classe de Seconde C D.** 2e édit. avec 271 fig. c. toile 3 fr.
II. **Classe de Première C D.** 2e édit. av. 399 fig. c. toile 4 fr.
III. **Classe de Mathématiques élémentaires.**
1 vol. avec 298 fig., cartonné toile. . . . . 4 fr.

Cours élémentaire de Physique

DEUXIÈME CYCLE (LETTRES)

(Sections A et B)

I. **Classe de Seconde A B.** 1 vol. avec 158 fig. 2 fr. 50
II. **Classe de Première A B.** 1 vol. avec figures.
III. **Classe de Philosophie.** 1 vol., avec 308 fig. . 4 fr.

Traité de Physique élémentaire, de Ch. Drion et E. Fernet. 13e *édition*, par E. Fernet, avec la collaboration de J. Faivre-Dupaigre. 1 vol. avec 665 fig. 8 fr. Cartonné . . . . 9 fr.

Précis de Physique, par E. Fernet. 28e édition, en collaboration avec J. Faivre-Dupaigre. 1 vol. in-18, avec 325 fig. cart. 3 fr.

Cours élémentaire de Physique, par E. Fernet. 4e édition. 1 vol. in-16, avec 473 figures, cartonné toile anglaise. 5 fr.

Cours de Physique pour la classe de Mathématiques spéciales. 4e *édition* (*entièrement nouvelle*), par E. Fernet et J. Faivre-Dupaigre, 1 vol. grand in-8, avec 758 fig. . . 18 fr.

GÉOMÉTRIE

Ouvrages de MM.

Ch. VACQUANT
Ancien Inspecteur général de l'Instruction publique.

A. MACÉ DE LÉPIN[AY]
Professeur de mathématiques sp[éciales] au lycée Henri IV.

Programmes du 27 juillet 1905

Classes de Sciences

Premiers éléments de Géométrie (5e *B*, 4e *B* et 3e *B*) 2e édition. 1 vol. in-16, cartonné toile . . . . 3 fr. 50

Éléments de Géométrie (*Seconde et Première C et D, Mathématiques*). 15e édition. Un vol. in-16 cartonné, toile . . . . 5 fr. 25

Classes de Lettres

Premières notions de Géométrie élémentaire (4e *A* et 3e *A*). 1 vol. in-16, cartonné toile . . . . 2 fr.

Géométrie élémentaire (*Seconde et Première A et B*). 1 vol. in-16, cart. toile.

Programmes de 1902

Classes de Lettres

Géométrie élémentaire, 2e PARTIE (*Seconde et Première A et B*). 1 vol. in-16 cart. 1 fr. 75

Cours de Géométrie élémentaire, à l'usage des élèves de mathématiques élémentaires, avec des compléments destinés aux candidats à l'École Normale et à l'École Polytechnique. 7e édition 1 volume avec 1000 figures . . . . 9 fr.
Cartonné . . . . 10 fr.

TRIGONOMÉTRIE

Ouvrages des mêmes auteurs

Cours de Trigonométrie. Nouvelle édition.

1re partie (Seconde et Première C et D et candidats aux écoles du gouvernement). 1 vol. in-8°, broché . . . . . . 3 fr.

2e partie (Mathématiques). 1 vol. in-8°, broché . . 2 fr. 50

Éléments de Trigonométrie. 2e édit. 1 vol. in-16, cart. toile anglaise . . . . 2 fr. 80

ÉLECTRICITÉ

Traité élémentaire d'Électricité,

par **M. JOUBERT**, inspecteur général de l'Instruction publique. 4e édition revue et augmentée. 1 vol. avec 382 figures. . . . 8 fr.

Cours élémentaire d'Électricité,

par **M. JOUBERT**, à l'usage des classes de l'Enseignement secondaire. 4e édit. 1 vol. in-16, avec 144 figures. . . . 2 fr.

SCIENCES NATURELLES

Cours élémentaire d'Histoire Naturelle

(*Zoologie, Botanique, Géologie et Paléontologie*)

Rédigé conformément aux programmes du 31 mai 1902

PAR MM.

M. BOULE
Professeur au Muséum d'histoire naturelle.

E.-L. BOUVIER
Professeur au Muséum d'histoire naturelle, Membre de l'Institut.

H. LECOMTE
Professeur au lycée Saint-Louis.

8 volumes in-16, cartonnés toile anglaise et illustrés de très nombreuses figures.

PREMIER CYCLE

Notions de Zoologie (Classes de sixième A et B). par E.-L. Bouvier. 2 fr. 50
Notions de Botanique (Classe de cinquième A et B), par H. Lecomte. 2 fr. 75
Notions de Géologie (Classes de cinquième B et quatrième A), par M. Boule . . . . 1 fr 75
Notions de Biologie, d'Anatomie et de Physiologie appliquées à l'homme (Classe de troisième B), par E.-L. Bouvier. . . . . 2 fr. 50

SECOND CYCLE

Géologie (Classe de seconde A, B, C, D), par M. Boule.. . . . . . 2 fr. 50
Anatomie et Physiologie végétales (Classes de philosophie et de mathématiques A et B), par H. Lecomte . . . . 2 fr. 50
Anatomie et Physiologie animales (Classes de philosophie et de mathématiques A et B, par E.-L. Bouvier. . . . . 4 fr.
Conférences de Paléontologie (Classes de philosophie A et B et de mathématiques A et B), par M. Boule . . . . 2 fr.

DROIT USUEL

Cours élémentaire de Droit usuel

Par T. VAQUETTE
Docteur en droit.

Deuxième Édition. 1 vol. in-16, cartonné toile . . . . . . 2 fr. 50

CHIMIE

Traité élémentaire de Chimie, par M. TROOST, membre de l'Institut, professeur honoraire à la Faculté des sciences de Paris, avec la collaboration de Ed. PECHARD, chargé de cours à la Faculté des Sciences de Paris.

14e *édition, entièrement refondue et corrigée.* 1 vol. in-8, avec 548 figures dans le texte. Broché, 8 fr. — Cartonné toile. . . . . 9 fr.

Cet ouvrage diffère très notablement de l'édition précédente. Les auteurs, s'inspirant des idées nouvelles introduites dans l'enseignement, ont supprimé un grand nombre d'expériences historiques et de préparations surannées qui encombraient l'enseignement. Ces suppressions leur ont permis de donner plus d'importance à la partie industrielle, si intimement liée au développement de la chimie, et d'exposer avec plus de précision les théories modernes dont l'utilité pédagogique est incontestable.

Précis de Chimie, par MM. TROOST et PÉCHARD.

36e *édition, conforme aux nouveaux programmes.* 1 vol. in-18, avec 306 figures, cartonné. . . . . 3 fr. 50

Pour répondre à la division des études en deux cycles, deux caractères ont été adoptés. Les parties imprimées en gros caractères correspondent au premier cycle, celles en petits caractères, au second cycle.

MÉMENTOS

à l'usage des Candidats aux Baccalauréats de l'Enseignement classique et moderne et aux Ecoles du Gouvernement.

Mémento de chimie, par M. A. Dybowski, professeur au lycée Louis-le-Grand. 7e *édition.* 1 vol. in-12 . . . 2 fr.

Questions de Physique. Énoncés et Solutions, par R. Cazo, docteur ès sciences. 5e *édition.* 1 vol. in-12. 2 fr.

Mémento d'Histoire naturelle, par M. Marage, docteur ès sciences. 1 vol in-12, avec 102 fig. . . . . . 2 fr.

Conseils pour la Composition française, la version, le thème et les épreuves orales, par A. Keller. 1 vol. in-12. . . . . 1 fr.

Résumé du Cours de Philosophie sous forme de plans, par A. Keller. 1 vol. in-12 . . . . 2 fr.

Histoire de la Philosophie, par A. Keller. 1 vol. 1 fr.

BURAT, professeur au lycée Louis-le-Grand.

Précis de Mécanique. 8e édition. 1 volume in-18, avec 259 figures, cartonné toile . . . . 3 fr.

DUCATEL, professeur agrégé de Mathématiques.

Leçons d'Arithmétique, à l'usage des classes élémentaires des lycées et collèges et de l'Enseignement primaire. 3e édition. 1 volume in-18, avec questionnaires, exercices et réponses aux exercices, cart. toile. 2 fr. 50

LAPPARENT (A. de), membre de l'Institut.

Abrégé de Géologie. 6e édition entièrement refondue. (*Sous presse*).

Traité de Géologie. 5e édition entièrement refondue et considérablement augmentée. 3 vol. gr. in-8° contenant xvi-2016 pages, avec 883 figures . . . . 38 fr.

Précis de Minéralogie. 3e édition. 1 vol. in-18, avec 335 figures et 1 planche, cartonné toile. . . . . 5 fr.

Leçons de Géographie physique. 2e édition. 1 vol. grand in-8, avec 163 fig. et 1 planche en couleurs. 12 fr.

MAUDUIT, ancien professeur au lycée Saint-Louis.

Précis d'Algèbre. 10e édition. 1 vol. in-18, cart. 1 fr. 60

Précis d'Arithmétique. 8e éd. 1 vol. in-18, cart. 1 fr. 40

NEVEU (Henri), agrégé de l'Université.

Cours d'Algèbre, à l'usage des classes de Mathématiques. 2e édit. 1 vol. in-8. . . . . 8 fr.

ROUBAUDI, professeur de mathématiques au lycée Buffon.

Cours de Géométrie descriptive. *Quatrième édition, conforme aux programmes du* 27 *juillet* 1905.

Fasc. I. *Classe de Première C* et *D*, avec 136 fig. 2 fr. 50

Fasc. II. *Classe de Mathématiques A* et *B*, avec 214 fig. 3 fr. 50

Les 2 fascicules réunis en un seul volume . . . . 5 fr.

SOLEIROL de SERVES, médecin gymnaste et Mme **LE ROUX**, professeur de gymnastique au lycée de Versailles.

Manuel de Gymnastique rationnelle et pratique (Méthode Suédoise). 1 vol. in-16, avec figures dans le texte, cartonné toile anglaise . . . . 2 fr.

58788. — Imprimerie LAHURE, 9, rue de Fleurus, à Paris



DATE DUE

